

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a optimalizace pokrytí prostoru pro vnitřní mobilní FSO  
sítě**

**Design and Optimalization of Coverage Area for Indoor Mobile  
FSO Networks**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Daniel Židek**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh a optimalizace pokrytí prostoru pro vnitřní mobilní FSO sítě.  
Design and Optimalization of Coverage Area for Indoor Mobile FSO  
Networks.

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte přehled možných způsobů pokrytí prostoru pro vnitřní FSO sítě.
2. Analyzujte tyto systémy z hlediska jejich vlastností a realizace.
3. U vybraných systémů experimentálně ověřte jejich pokrytí prostoru.
4. Naměřené hodnoty porovnejte s hodnotami SW simulace.

Seznam doporučené odborné literatury:

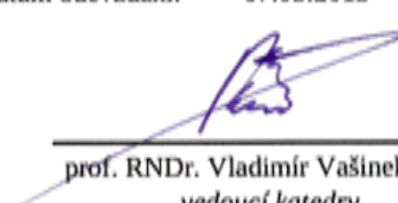
- [1] Adrian Mihaescu, Pascal Besnard: *Indoor Wireless Optical Communications*, 8th International Conference on Communications, Bucharest, Romania, 2010.
- [2] Jaw-Luen Tang, Yao-Wen Chang, *Design of an Omnidirectional Multibeam Transmitter for High-Speed Indoor Wireless Communications*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2010, Article ID 728468

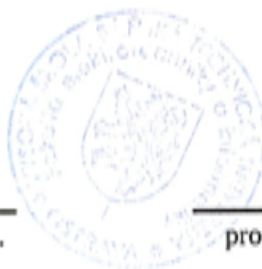
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

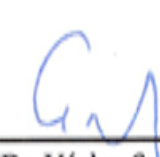
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Hejduk**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dňa: 02.05.2013

  
.....  
podpis študenta

## **Pod'akovanie**

Rád by som poďakoval Ing. Stanislavovi Hejdukovi za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto bakalárskej práce.

## **Abstrakt**

Bakalárska práca je zameraná na návrh pokrytia vnútorných priestorov mobilnými FSO sieťami. V práci je uvedený teoretický popis a zloženie vnútorných optických bezdrôtových systémov. Ďalej sa tu nachádza popis komunikačného systému s využitím viditeľného svetla a problematika návrhu bezdrôtových optických spojení. Obsahuje prehľad možných spôsobov pokrytia priestoru vnútornými FSO sieťami, ich analýzy a vlastnosti. V praktickej časti sa nachádza experimentálne overovanie navrhnutých pokrytí priestoru viditeľným svetlom z dvoch typov LED diód a ich simulácie v software LightTools. Na záver je tu porovnanie medzi nameranými a nasimulovanými hodnotami pokrytí priestoru.

## **Kľúčové slova**

vnútorné optické bezdrôtové spojenie, LED, viditeľné svetlo, spôsoby pokrytia, pokrytie priestoru, priama viditeľnosť, nepriama viditeľnosť, návrh, simulácia

## **Abstract**

The thesis is focused on the design of the indoor coverage of mobile FSO networks. In this thesis is presented a theoretical description of the composition and indoor optical wireless systems. Furthermore, there is a description of the communication system using visible light and design issues of optical wireless links. Contain an overview ways of coverage area indoor FSO networks, their analysis and properties. The practical part is experimental verification of the proposed coverage area of visible light with two types of LEDs and their simulation in software LightTools. Finally there is a comparison between measured and simulated values of coverage area.

## **Key words**

indoor free space optics, LED, visible light, methods of coverage, coverage area, line of sight, non-line of sight, design, simulation

## Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\Theta$	rad	Rozdiel uhlov
$\pi$	-	Ludolfovo číslo
$\Delta l$	m	Dĺžkový rozdiel
$\Delta t$	s	Časový rozdiel
$c$	$\text{m.s}^{-1}$	Rýchlosť svetla
$R$	m	Rozsah
$S_{\text{A}_R}$	$\text{m}^2$	Plocha prijímača
$S_{\text{A}_T}$	$\text{m}^2$	Plocha vysielača
$\lambda$	nm	Vlnová dĺžka

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
<b>APD</b>	Avalanche Photodiode	Lavínová fotodióda
<b>BS</b>	Base Station	Zakladá stanica
<b>FOV</b>	Field Of View	Zorné pole
<b>FSO</b>	Free Space Optics	Bezdrôtové optické siete
<b>IM/DD</b>	Intensity Modulation with Direct Detection	Intenzita modulácie s priamou detekciou
<b>IR</b>	Infrared	Infračervený
<b>IrDA</b>	Infrared Data Association	Infrared Data Association
<b>ISI</b>	Intersymbol Interference	Medzisymbolová interferencia
<b>LD</b>	Laser Diode	Laserová dióda
<b>LED</b>	Light Emitting Diode	Dióda vyžarujúca svetlo
<b>LOS</b>	Line Of Sight	Priama viditeľnosť
<b>non-LOS</b>	non Line Of Sight	Nepriama viditeľnosť
<b>PIN</b>	PIN Photodiode	PIN fotodióda
<b>RT</b>	Remote Terminal	Vzdialený terminál
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio	Odstup signálu od šumu
<b>VLC</b>	Visible Light Communication	Komunikácia viditeľným svetlom



# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Vnútrotný optický bezdrôtový systém.....	2
2.1	Optický vysielač .....	3
2.2	Prenosové médium .....	4
2.3	Optický prijímač.....	5
3	Komunikácia viditeľným svetlom s využitím bielych LED diód.....	6
3.1	Výhody komunikácie viditeľným svetlom .....	7
4	Výzvy a prekážky pri návrhu vnútrotných optických spojení .....	8
4.1	Rušenie z okolitých svetelných zdrojov .....	8
4.2	Viaccestné šírenie signálu .....	8
4.3	Optický výkon .....	10
5	Spôsoby pokrytia priestoru pre vnútrotné FSO siete.....	11
5.1	Systémy s priamou viditeľnosťou LOS.....	11
5.1.1	Smerové a hybridné LOS systémy .....	11
5.1.2	Nesmerové LOS systémy .....	13
5.2	Systémy s nepriamou viditeľnosťou non-LOS (difúzne) .....	14
5.2.1	Smerové non-LOS systémy .....	14
5.2.2	Hybridné non-LOS systémy .....	15
5.2.3	Nesmerové non-LOS systémy .....	16
6	Experimentálne overenie pokrytia priestoru .....	17
6.1	Použité typy LED diód .....	17
6.2	Pokrytie priestoru u vybraného systému .....	20
6.2.1	Pokrytie priestoru LED diódou POWER WHITE.....	22
6.2.2	Pokrytie priestoru LED pásikom SMD 5050 RGB .....	23
7	Softwarová simulácia pokrytia priestoru.....	25
7.1	Simulácia pokrytia LED diódou a LED pásikom.....	25
7.1.1	Analýza hodnôt získaných simuláciou pokrytia LED diódou .....	26
7.1.2	Analýza hodnôt získaných simuláciou pokrytia LED pásikom.....	27
8	Grafické porovnanie nameraných hodnôt s hodnotami SW simulácie.....	28
8.1	Porovnanie pokrytí priestoru LED diódou .....	28
8.2	Porovnanie pokrytí priestoru LED pásikom.....	30
9	Simulácie optimalizácie pokrytia priestoru .....	32
9.1	Simulácia optimalizácie pokrytia priestoru LED diódami .....	32

9.2	Simulácia optimalizácie pokrytia priestoru LED pásikmi.....	34
10	Záver.....	37
	Použitá literatúra .....	38
	Zoznam príloh .....	40

---

# 1 Úvod

Vývoj vnútornej optickej bezdrôtovej komunikácie získal najmä vďaka vysokej rýchlosti a flexibilnej optickej komunikácie za priaznivú cenu v posledných rokoch veľkú pozornosť. Bezdrôtové optické spojenie ponúka pre vnútorné bezdrôtové aplikácie bezpečnú a nádejnú alternatívu k rádiovkej komunikácii. Táto bakalárska práca má za úlohu priblížiť spôsoby pokrytia rozvíjajúcich sa vnútorných mobilných FSO sietí, navrhnúť a zároveň experimentálne overiť pokrytie priestoru a porovnať ho s výsledkami softwarovej simulácie.

Nasledujúca kapitola práce obsahuje charakteristiku a zloženie vnútorného optického bezdrôtového systému. Sú tu uvedené technológie pre takúto komunikáciu, možné typy vysielačov a prijímačov a charakterizovanie prenosového média.

V tretej kapitole je popis komunikácie viditeľným svetlom, ktorá je novou rozširujúcou sa bezpečnou technológiou s množstvom výhod. Spája v sebe možnosť komunikácie a zároveň aj osvetlenia priestorov či už v priemysle, administratívnych budovách alebo v domácnosti. Tak ako aj pri iných komunikačných systémoch, tak aj tu navrhovanie optickej bezdrôtovej komunikácie v sebe nesie určité úskalia, ktoré je treba poznať a vyriešiť pred samotným zavedením tohto systému. Čo už je náplňou štvrtej kapitoly.

Piata kapitola popisuje možnosti viacerých typov rozdelenia podľa rôznych stupňov smerového orientovania vysielača a prijímača a ich vlastností. Hlavnú úlohu tu zohráva priama viditeľnosť týchto dvoch častí optického bezdrôtového spojenia.

Šiesta kapitola obsahuje samotný návrh pokrytia a jeho experimentálne overenie pre dva typy vysielačov, v tomto prípade dva typy LED diód. Sú v nej uvedené a analyzované výsledky pokrytí spolu s grafickými zobrazeniami pokrytí priestoru.

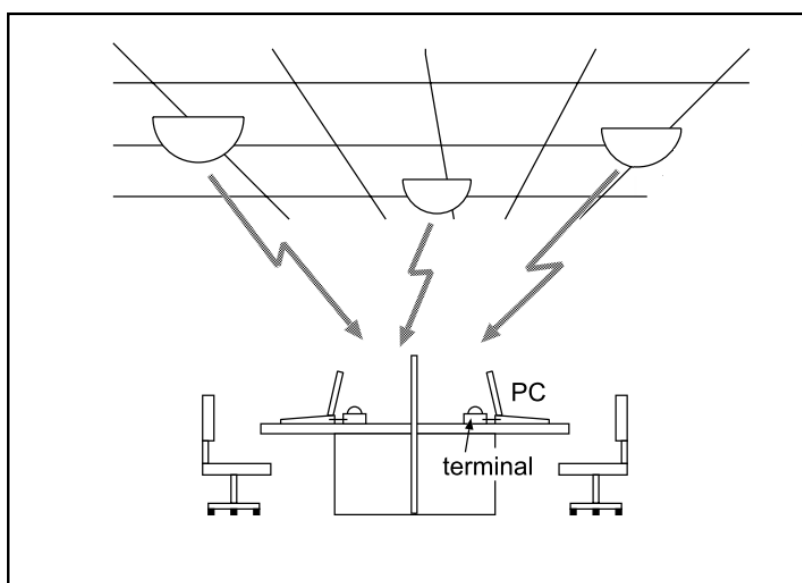
Siedmou kapitolou je softwarová simulácia pokrytia priestoru. Obsahuje simulácie pokrytí totožných systémov ako pri experimentálnom overovaní a ich zhodnotenie.

Ďalšou kapitolou je porovnanie hodnôt získaných meraním vďaka overovaniu pokrytia a hodnôt zo simulácie pokrytia priestoru.

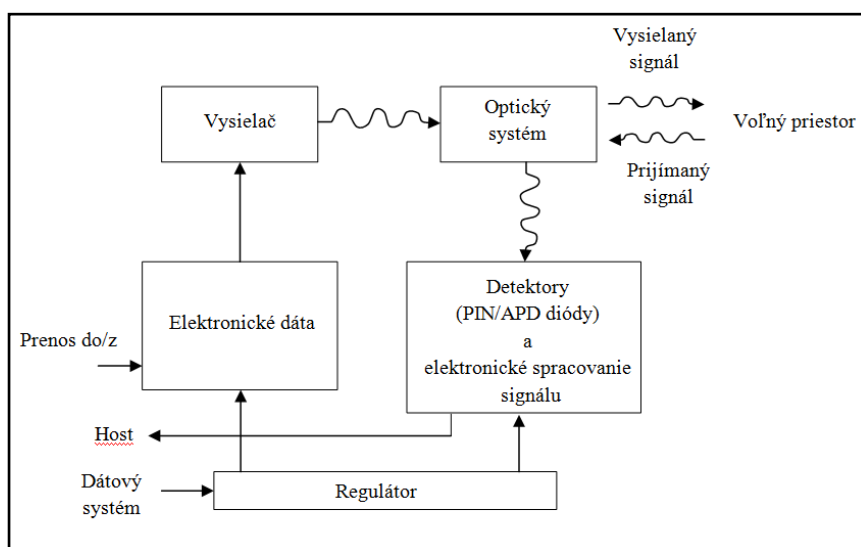
Poslednou kapitolou sú simulácie na vytvorenie optimalizovaných pokrytí priestoru. Na základe zadaných rozmiestnení vysielačov vedúcim bakalárskej práce vznikli simulácie pre rôzne typy umiestnení LED diód.

## 2 Vnútný optický bezdrôtový systém

Vnútná optická bezdrôtová komunikácia zahŕňa dve hlavné technológie a to komunikáciu viditeľným svetlom VLC (Visible Light Communication) a infračerveným IR (Infrared) svetlom. Základ týchto optických bezdrôtových systémov tvorí vysielateľ, prijímač a voľný priestor ako prenosové médium. Informácia v digitálnej podobe je privedená na vstup elektronických obvodov, ktoré modulujú vysielací zdroj svetla. Zdrojový výstup prechádza optickým systémom do voľného priestoru. Pri prijímanom signáli sa taktiež využíva optický systém, ktorým prechádza optický signál na detekciu a následné spracovanie pomocou elektronických obvodov. Typický vnútorný optický bezdrôtový systém je zobrazený na Obrázku 2.1 a v blokovej schéme na Obrázku 2.2.



Obrázok 2.1: Typický vnútorný optický bezdrôtový systém



Obrázok 2.2: Blokova schéma vnútorného optického bezdrôtového systému

Optické bezdrôtové systémy využívajú technológiu založenú na intenzite spojenia modulácie s priamou detekciou z optického nosiča. Intenzita modulácie sa riadi zmenou veľkosti prúdu na LED alebo LD diódach. Tento typ modulácie sa označuje aj ako priama modulácia. Priama detekcia sa vykonáva pomocou PIN fotodiód alebo APD diód. Tieto diódy produkujú elektrický prúd úmerný dopadajúcemu optickému výkonu.

## 2.1 Optický vysielateľ

Optické vysielateľe tvoria predovšetkým LED diódy a LD diódy. Vhodnejší typ diód pre vnútorné optické bezdrôtové vysielateľe sú LD diódy naproti LED diódam. Tieto LD diódy majú vyšší optický výkon, širšiu moduláciu pásma a lineárnu prevodovú charakteristiku elektrického signálu na optický. Pri použití sofistikovaných modulačných schém ako napríklad viac úrovňová signalizácia je práve lineárnosť v prevode signálu obzvlášť dôležitá. LD diódy ponúkajú pre prenos bitové rýchlosti niekoľko Gbps. Laserové diódy sú zdrojom vysokého smerového žiarenia a môžu dodať vysoký výkon na malom priestore. Najmä po zásahu ľudského oka môže viesť k trvalej slepote. Vzhľadom k bezpečnosti ľudského zraku sa laserové diódy používajú menej vo vnútorných bezdrôtových systémoch ako LED diódy, pretože môžu veľmi ľahko zasiahnuť oko. Preferovanejším zdrojom svetla pre väčšinu vnútorných aplikácií sú teda LED diódy. Sú to veľkoplošné žiariče s bezpečnou prevádzkou v relatívne vyšších výkonoch. Pre vysielanie v nižších výkonoch sa môže použiť pole LED diód. Porovnanie LED diód a LD diód je uvedené v tabuľke 2.1.

Tabuľka.2.1: Porovnanie medzi LED a LD diódami

Charakteristika	LED diódy	LD diódy
Vlnová dĺžka (Wavelength)	245-7000 nm	263-13900 nm
Spektrálna šírka (Spectral width)	25-100 nm (10-50 THz)	$< 10^{-5}$ to 5 nm ( $< 1$ MHz to 2 THz)
Modulácia šírky pásma (Modulation bandwidth)	Desiatky kilohertz až desiatky megahertz	Desiatky kilohertz až desiatky gigahertz
Účinnosť elektricko-optickej premeny (E/O conversion efficiency)	10-20 %	30-70 %
Bezpečnosť vzhľadom k zraku (Eye safety)	Považované za zraku bezpečné	Musia byť vyjadrené ako zraku bezpečné najmä pre $\lambda < 1400$ nm
Cena (Cost)	Nízka	Stredná až vysoká

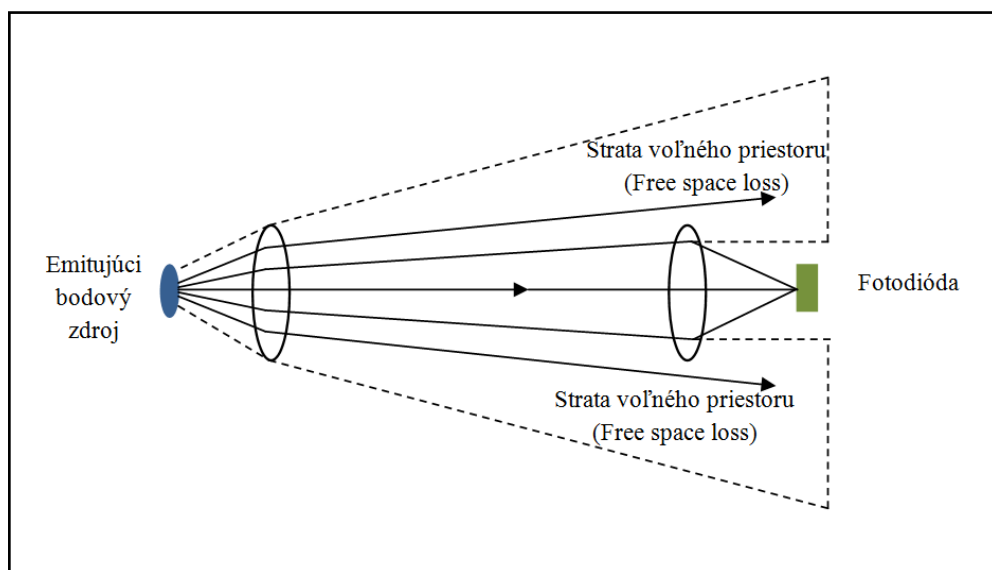
V tabuľke 2.1 je uvedené porovnanie medzi LED a LD diódami, ktoré sa v súčasnosti používajú vo vnútorných optických bezdrôtových systémoch. Vlnové dĺžky pri LED diódach sa pohybujú od 245 nm do 7000 nm. Sú výhodnejšie najmä vďaka svojej cene a bezpečnosti k ľudskému zraku. Nedostatk dnešných LED diód je menšia účinnosť premeny elektrickej energie na optickú ako môžeme vidieť v tabuľke. Táto účinnosť predstavuje 10-20% u novších LED diód to môže byť okolo 40%. Ďalej u LED diód je modulácia šírky pásma obmedzená na niekoľko desiatok MHz a veľkosť spektrálnej šírky vyžaduje použitie prijímača zo širokou optickou priepustnosťou.

LD diódy sú drahšie ako LED diódy, ale ich charakteristiky sa blížia ideálnym charakteristikám. LD diódy majú vlnové dĺžky od 375 nm až po 13900 nm. Elektricko-optická účinnosť premeny tu dosahuje 30 až 70%, modulácia šírky pásma je v rozsahu od stoviek MHz do viac než 10 GHz a spektrálna šírka LD diód je veľmi úzka. Z hľadiska bezpečnosti ľudského zraku pri LD diódach sa vyžaduje laserový výstup nechať prejsť cez ďalší optický prvok, napríklad cez prenosový difúzor. Tento difúzor zruší jeho priestorovú súdržnosť a rozprestrie žiarenie po dostatočne širokej vyžarovacej clone a uhle. Potenciálne riziko poškodenia ľudského zraku znižujú u LD diód vlnové dĺžky nad 1400nm [1,2].

## 2.2 Prenosové médium

Šírenie signálu tak ako v každom inom bezdrôtovom systéme tak aj v optických bezdrôtových systémoch je závislé na atmosférických stratách, ktoré sa vyskytujú v drahé šírenia. Vnútorná atmosféra je bez poškodenia vonkajšími vplyvmi akými sú napríklad hmla, mraky. Vo vnútorných optických bezdrôtových systémoch sa však vyskytuje strata vo voľnom priestore a útlm signálu.

**Strata vo voľnom priestore** - Strata signálu vo voľnom priestore je súčasťou vysielacieho výkonu, ktorý sa stráca alebo nie je prijímačom zachytený ako možno vidieť na Obrázku 2.3.



Obrázok 2.3: Strata signálu vo voľnom priestore [1]

**Útlm signálu** – vyskytuje sa vo vonkajších aj vo vnútorných optických bezdrôtových systémoch. Príčinou je, že prijímač prijíma signál pomocou rôznych ciest jeho šírenia v miestnosti. Niektoré cesty sa rušia zámerné aby sa účinne znížil výkon prijímaného signálu. Tento typ degradácie signálu je známy aj ako viaccestný útlm signálu (multi-path signal fading) [1].

## 2.3 Optický prijímač

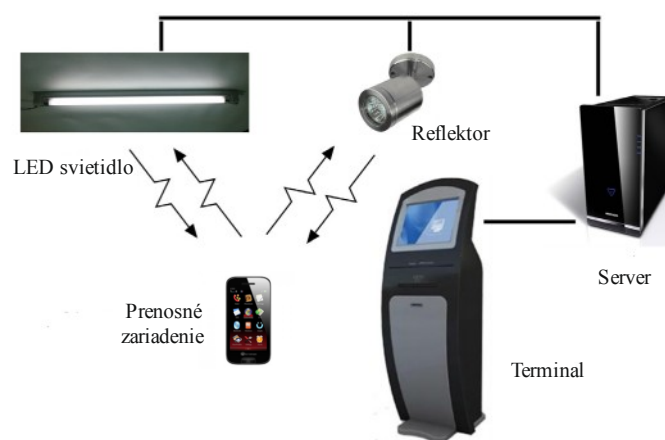
Optické prijímače väčšinou využívajú transimpedančnú konštrukciu. To poskytuje dobrý kompromis medzi šírkou pásma a šumom, kde tieto faktory ovplyvňujú kapacitu fotodiódy. Konštrukcie fotodiód tolerujúce veľmi vysoké vstupné kapacity sú povinné, takže optické bezdrôtové prijímače musia používať fotodiódy s výrazne väčšou aktívnou oblasťou. Transimpedančná konštrukcia môže byť stále používaná, ale v záujme dosiahnutia užitočnej šírky pásma v prítomnosti vysokej vstupnej kapacity spätnoväzobná impedancia musí byť veľmi nízka, čo zvyšuje šum a znižuje citlivosť. Lepšia konštrukcia bežná v optických bezdrôtových prijímačoch kombinuje transimpedanciu s bootstrappingom, kde bootstrapping znižuje efektívnu kapacitu fotodiódy. Umožňuje to použitie relatívne vysokej spätnoväzobnej impedancie, ktorá znižuje šum a zvyšuje citlivosť [2].

Optické prijímače využívajúce bootstrapping možno rozdeliť na základne použitých detekčných diód. Existujú dva typy základných detekčných diód a to PIN diódy a APD diódy. Optické prijímače s PIN diódami sú používané bežne najmä vďaka svojej nízkej cene, tolerancii k veľkým teplotným výkyvom a nízkemu napájaciemu napätiu. Optické prijímače využívajúce PIN diódy sú o 10 až 15 dB citlivejšie ako prijímače, ktoré využívajú APD diódy. Kompenzovanie zníženej citlivosti týchto prijímačov je zvýšením výkonu vysielača a použitím väčšieho priemeru objektívu prijímača. Optické prijímače využívajúce APD diódy však ponúkajú zvýšenú energetickú rezervu čo umožňuje robustnejšie komunikačné spojenie a zníženie potreby presného nasmerovania objektívov. Tieto vlastnosti umožňujú znížiť výkon optického vysielača. Okrem toho lepší vnútorný zisk APD diódy zvyšuje odstup signálu od šumu (SNR). Optické prijímače, ktoré využívajú APD diódy sú však nákladné a potrebujú vysoké prevozné napätie. Používajú sa prevažne v špecializovaných systémoch, kde je kľúčový výkon [1, 2].

---

### 3 Komunikácia viditeľným svetlom s využitím bielych LED diód

Komunikácia viditeľným svetlom VLC (Visible Light Communication) si získava pozornosť pre cenovo výhodnú realizáciu prenosového systému v spojení s osvetlením. Pre tento systém sa využíva biele svetlo z LED diód. Biele LED diódy sú ďalšou generáciou svetelných zdrojov. Tieto diódy majú vysokú účinnosť, dlhú životnosť a sú šetrné k životnému prostrediu. Môžu byť modulované na pomerne vysoké prenosové rýchlosti, čo ich činí vhodnými zdrojmi pre prenos dát. Z tohto dôvodu je možné využiť biele LED diódy súbežne na realizáciu osvetlenia a aj komunikácie.

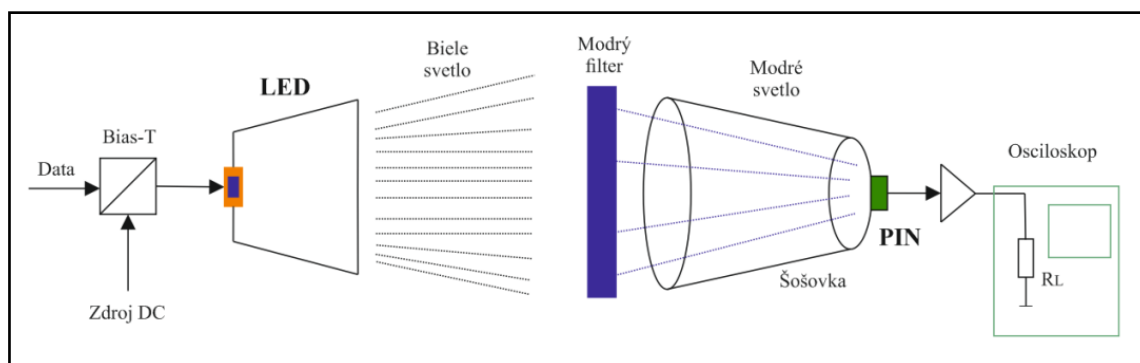


Obrázok 3.1: Komunikácia viditeľným svetlom

Na Obrázku 3.1 je znázornený bezdrôtový optický systém, kde dáta prichádzajú do siete v kancelárii alebo domu a sú vysielané z optických prístupových bodov tvorených z bielych LED diód v každej miestnosti. Jedná sa teda o kombináciu káblovej a bezdrôtovej technológie. Káblové prístupové body v spojení s LED diódami poskytujú prístup k bezdrôtovej sieti. Dáta vysielané prostredníctvom LED svetiel poskytujú spojenie typu bod-viac bodov a namierený reflektor realizuje spojenie typu bod-bod. Biele LED diódy v prístupových bodoch neosvetľujú len miestnosť, ale aj modulujú elektrické signály do svetelných vln tak rýchlo, že ľudský zrak to nie je schopný zaznamenať. Preto úloha osvetlenia neruší bezdrôtovú optickú komunikáciu. Intenzita modulácie s priamou detekciou sa používa ako metóda optickej pulznej modulácie pre tento systém. Prenášané optické impulzy z LED diód sú prijímané na užívateľskom termináli, ktorý je zložený z fotodiód a môže prevádzať optické impulzy na elektrické signály [10, 13].

Existujú dva typy bielych LED diód, ktoré sa používajú na osvetlenie a komunikáciu. Prvým typom sú zariadenia, ktoré v sebe spájajú samostatné červené, zelené a modré emitory. Druhým typom sú zariadenia, ktoré používajú modré emitory v kombinácii s nažltlým fosforom. Tie sú preferovanejšou možnosťou pre osvetlenie, pretože majú nižšiu zložitosť ako zariadenia využívajúce tri emitory. Typická modulácia šírky pásma týchto zariadení je však niekoľko MHz. Toto obmedzenie šírky pásma je najmä v dôsledku pomalej časovej odozvy fosforu.





Obrázok 3.2: VLC spojenie

Na Obrázku 3.2 môžeme vidieť typickú komunikáciu viditeľným svetlom s využitím bielych LED diód. Modré svetlo môže byť ľahko extrahované zo vstupného optického zväzku pomocou optického filtra na prijímači a tým sa podstatne zvyšuje šírka pásma [12].

### 3.1 Výhody komunikácie viditeľným svetlom

Táto nová komunikačná technológia v spojení s osvetlením ponúka niekoľko výhod. Komunikácia viditeľným svetlom VLC môže dosiahnuť vysoký prenosový výkon s malým tieneným vzhľadom k požadovanej intenzite osvetlenia a distribuovaných svietidiel. Komunikačné komponenty sa môžu jednoducho integrovať použitím bielych LED diód, ktoré výrazne znižujú celkové náklady [11]. Nerušia rádiový frekvenčné obvody v elektronike, čo umožňuje tieto systémy nasadiť do nemocníc, lietadiel. Neporušujú zdravotné predpisy ohľadom ľudského zraku, pokožky a výrazne znižujú stopy oxidu uhličitého v prostredí vďaka svojej nízkej spotrebe energie. Ďalšou výhodou tejto technológie je vysoký stupeň súkromia a bezpečnosti, pretože optické signály neprenikajú cez steny.

Predpokladá sa, že vnútorné bezdrôtové aplikácie budú založené na využití bielych LED diód, než na infračervených LED diódach.

#### Výhody komunikácie viditeľným svetlom oproti komunikácii s infračerveným svetlom:

- Prenos dát spolu s osvetlením miestnosti a iných vnútorných priestorov.
- Inštalácia bezdrôtovej siete založenej na existujúcej infraštruktúre vnútorného osvetlenia by bolo pravdepodobnejšie jednoduchšie a cenovo výhodnejšie ako zriadenie samostatnej infračervenej siete.
- Menšia pravdepodobnosť blokovania signálu a priama viditeľnosť zariadení na väčšine priestoroch v miestnosti z dôvodu umiestnenia prístupového bodu na strop (malý účinok viaccestného šírenia).
- Je možné získať vysoký odstup signálu od šumu SNR (Signal-to-Noise Ratio), ktorý je nepriamym dôsledkom požiadaviek osvetlenia.

VLC komunikácia má veľký potenciál v mnohých aplikáciách [13].

---

## 4 Výzvy a prekážky pri návrhu vnútorných optických spojení

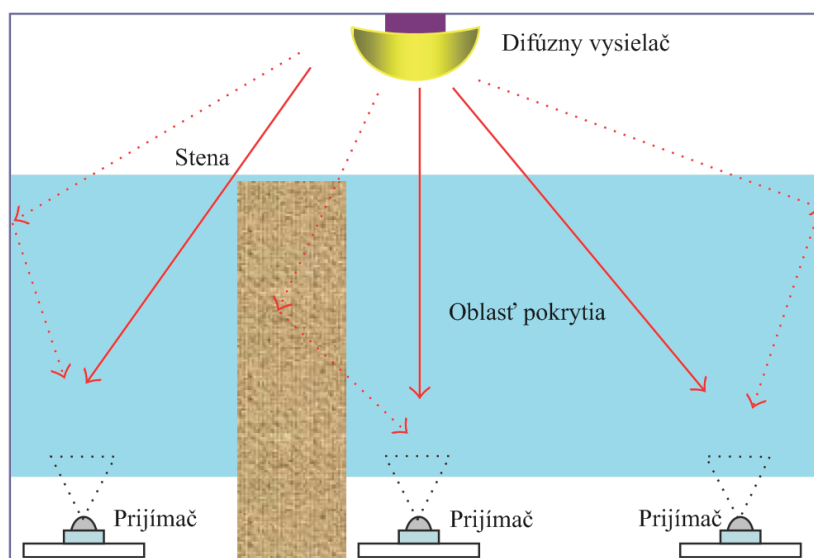
Dosiahnutie vysokého odstupe elektrického signálu od šumu (SNR) je najväčším problémom pri návrhu optického systému. Problém vzniká v dôsledku dvoch dôvodov. Prvým je, že odstup signálu od šumu z IM/DD systému závisí na druhej mocnine priemerného výkonu prijímaného optického signálu. To znamená, že jeden z nich by mal prenášať na relatívne vyšších výkonových úrovniach, aj keď výkon vysielača je obmedzený z hľadiska očnej bezpečnosti pri IR systémoch a spotreby energie. Druhým dôvodom je, že v mnohých prostrediach existuje intenzívny šum, ktorý zavádza záber bieleho šumu do prijímača. Okrem okolitého hluku šírka pásma bezdrôtových optických systémov je tiež limitovaná vzhľadom k medzisymbolovej interferencii (ISI) produkovaných viaccestnými disperziami optických kanálov [1].

### 4.1 Rušenie z okolitých svetelných zdrojov

Dominantným zdrojom šumu vo vnútorných optických bezdrôtových systémoch je okolité svetlo, ktoré je zvyčajne kombináciou fluorescenčného svetla, slnečného žiarenia a svetla zo žiarovky. Všetky spôsoby optického šírenia signálu trpia prítomnosťou okolitého svetla. Svetelné zdroje vnútorného prostredia vyžarujú prevažne v rovnakej vlnovej dĺžke ako optický dátový signál. Tiež typické úrovne intenzity okolitého svetla zhromaždene na fotodetektore sú zvyčajne oveľa vyššie ako úroveň intenzity dátového signálu. Okolité svetlo vyvoláva záber šumu vďaka náhodnej povahe fotodetekčného procesu. Navyše umelé svetlo vyvoláva rušenie v dôsledku periodických zmien intenzity osvetlenia. Tieto rozdiely môžu vzniknúť pri frekvenciách dvojnásobného napájacieho napätia a na spínacej frekvencii elektronických predradníkov žiaroviek. Všeobecne platí, že nízke a stredné prenosové rýchlosti okolitého šumu sú hlavným faktorom znižujúcim výkon bezdrôtových optických systémov [1].

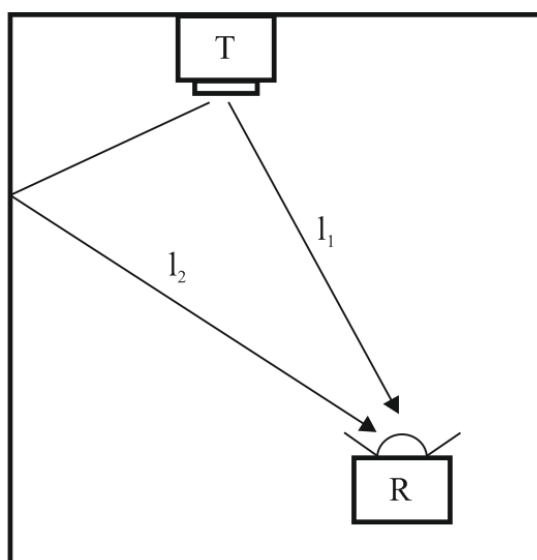
### 4.2 Viaccestné šírenie signálu

Kanálová disperzia spojená s viaccestným šírením je ďalšou dôležitou otázkou vo vnútorných optických bezdrôtových systémoch. Viaccestný jav nastáva, keď vysielaný signál nasleduje rôzne cesty pri svojej trase do prijímača vzhľadom k jeho odrazu od stien, stropov a iných objektov (Obrázok 4.1). Viaccestné javy môžu spôsobiť medzisymbolovú interferenciu (ISI). Difúzne systémy sú viac náchylné k viaccestným efektom ako systémy s namiereným lúčom. To je preto, že ich väčšia šírka lúča vedie k viacerým potenciálnym odrazovým plochám a väčšie zorné pole ich detektorov má za následok detekovanie väčšieho množstva odrazeného svetla [1].



Obrázok 4.1: Viaccestné šírenie signálu [4]

Pokrytie oblasti optickým signálom je z hľadiska najlepšieho výkonu pri systémoch bod-bod. Ale keď príde na mobilitu a jednoduchú realizáciu je lepšia difúzna sieť, kde vysielané svetlo pokrýva celú oblasť kvôli odrazom od prekážok. Toto priviedlo k problému oneskorenia a rozšírenia optických pulzov, ktoré obmedzujú prenosovú rýchlosť. Tento problém je znázornený na Obrázku 4.2, kde lúč svetla  $l_1$  putujúci z vysielateľa priamo bez odrazov potrebuje menší čas aby dorazil do vysielateľa ako lúč  $l_2$ , ktorý sa odráža od steny v miestnosti.



Obrázok 4.2: Dôsledky viaccestného šírenia signálu

Svetlo potrebuje veľa času než sa dostane z vysielača do prijímača a pretože svetlo ide do prijímača rôznymi smermi súčasne, prijímač dostane rovnaký signál v rôznych časoch. Tento rozdiel v čase  $\Delta t$  je daný:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c} [s] \quad (4.1)$$

kde:

$\Delta l$  - rozdiel dĺžok  
 $c$  - rýchlosť svetla

Takže ak je rozdiel medzi cestami svetla 1 meter, rozdiel v čase je približne 3 nanosekundy, čo môže byť problematické pri vysokých frekvenciách [14].

### 4.3 Optický výkon

Vyžiarené svetlo z LED diód má kužeľovitý rozptyl. Optický výkon takto vyžiareného svetla sa po každom zdvojnásobení vzdialenosti medzi vysielačom a prijímačom zníži o štvrtiny. Toto je popísané nasledujúcim vzorcom, kde v každom mieste prierezu kužeľovitého rozptylu môže byť vyžiarený optický výkon vypočítaný ako [15]:

$$\frac{SA_R}{SA_T + \frac{\pi}{4}(\theta R)^2} \quad (4.2)$$

kde:

$SA_R$  - plocha prijímača  
 $SA_T$  - plocha vysielača  
 $\theta$  - rozdiel uhlu  
 $R$  - je rozsah v metroch

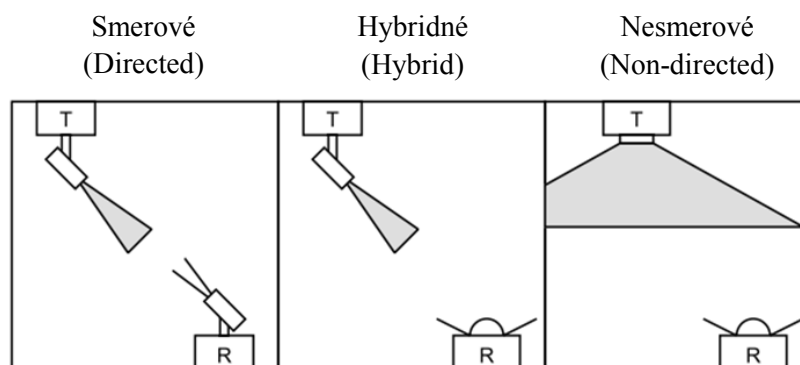
## 5 Spôsoby pokrytia priestoru pre vnútorné FSO siete

Pre vnútorné optické bezdrôtové systémy je k dispozícii niekoľko spôsobov pokrytia (techník prenosu). Tieto techniky sú klasifikované podľa stupňa smerového orientovania vysielača a prijímača. Vysielač a prijímač môžu mať úzky alebo široký vyžarovací diagram alebo zorné pole FOV (Field Of View) a dajú sa kombinovať ako smerovo riadené, nesmerovo riadené a hybridné systémy [1]. Pokrytie vnútorných priestoroch FSO sieťami je možné realizovať rozdielnymi vnútornými bezdrôtovými spojeniami.

Vnútorné optické bezdrôtové prenosové techniky môžu byť tiež klasifikované ako techniky s priamou viditeľnosťou LOS (Line Of Sight) alebo techniky s nepriamou viditeľnosťou non-LOS (non-Line Of Sight) v závislosti na tom, či má byť cesta s priamym alebo nepriamym smerom medzi vysielačom a prijímačom. Tieto dve konfigurácie systémov LOS a non-LOS sú najbežnejšie [1].

### 5.1 Systémy s priamou viditeľnosťou LOS

V systéme s priamou líniou výhľadu LOS medzi vysielačom a prijímačom je komunikácia pomocou optického nosiča medzi týmito zariadeniami zabezpečená priamou cestou. Na Obrázku 5.1 sú zobrazené všetky možné konfigurácie LOS pre optický bezdrôtový prenos.



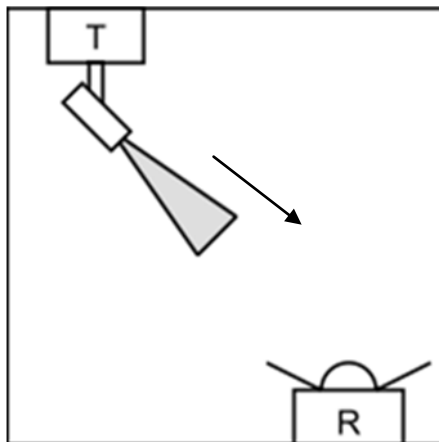
Obrázok 5.1: Techniky s priamou viditeľnosťou LOS

Vysielač (T) a prijímač (R) sú vo vysielačom LOS režime. Lúč môže ísť priamo z vysielača do prijímača bez odrazov. Všeobecne platí, že smerové LOS spojenia minimalizujú útlmy a maximalizujú výkonovú účinnosť a môžu dosahovať vyššie prenosové rýchlosti. Tieto systémy však vyžadujú presné nasmerovanie a pri výskyte tienenia sa výrazne znižuje ich funkčnosť [1].

#### 5.1.1 Smerové a hybridné LOS systémy

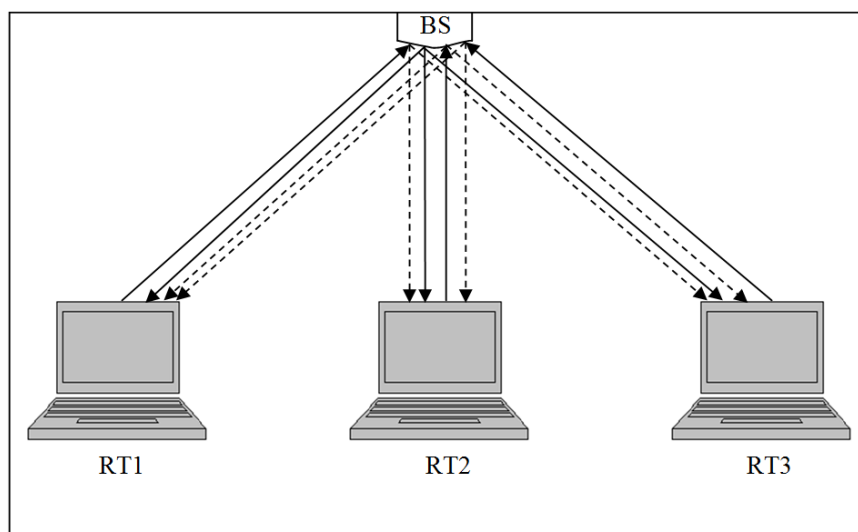
Najviac rozšírené systémy s nízkymi stratami na vedení sú smerovo riadené a hybridné LOS spojovacie systémy. Smerový a hybridný LOS systém nie je ovplyvnený viaccestným šírením a šum v pozadí je z veľkej časti blokovaný. Preto je prenosová rýchlosť obmedzená iba dostupným výkonovým rozsahom. Pomocou tejto techniky možno dosiahnuť vyššie prenosové rýchlosti. Hybridný LOS systém vznikne kombináciou vysielača a prijímača s rôznymi stupňami smerovosti. Pri hybridnom LOS systéme je fotodióda v prijímači (R) najčastejšie zapuzdrená v pologuľovej plastovej šošovke, ktorá slúži na sústredenie prijatého svetla, zatiaľ čo zachováva relatívne široké

zorné pole okolo  $60^\circ$  (Obrázok 5.2). To umožňuje, že môže mať prijímač rôzne stupne smerovosti. Hybridne LOS spojenia sú tak isto náchylné na blokovanie a ich výkonová účinnosť je znížená, ale predstavujú vyššie pokrytie ako smerové LOS spojenia.



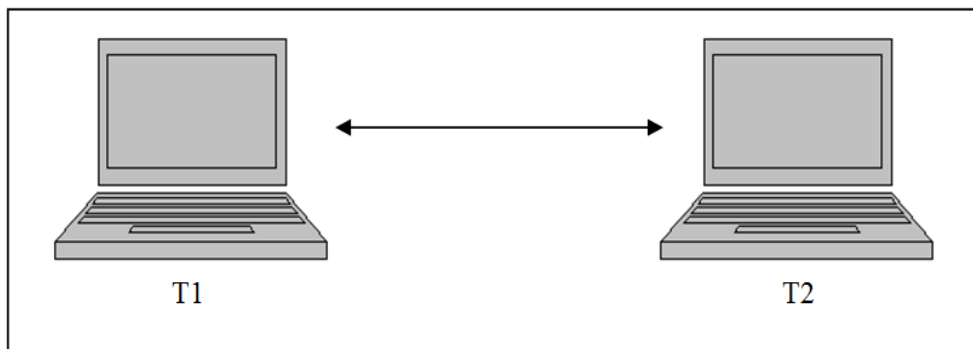
Obrázok 5.2: Hybridný LOS systém

Na Obrázku 5.3 je znázornený ďalší typ hybridného LOS systému. V tomto systéme je základná stanica BS (Base Station) s relatívne širokým pokrytím tvorená pasívnym alebo aktívnym reflektorom. BS sa zvyčajne upevňuje na strop v miestnosti. Základná stanica prijíma (vysiela) signál zo (do) vzdialených terminálov RT (Remote Terminal). V spojení medzi ktorýmkoľvek terminálom a základnou stanicou musí byť vždy zachovaná priama viditeľnosť. V dôsledku toho nemôže byť terminál plne mobilný. Vysielač musí byť nasmerovaný na základnú stanicu alebo musí mať dostatočne široké zorné pole, aby bola umožnená komunikácia z ľubovoľnej pozície v miestnosti medzi týmto terminálom a základnou stanicou. V inej forme hybridnej LOS techniky, môže vysielateľ poslať optický signál do priestoru určeného na strope v miestnosti a prijímač musí smerovať na túto oblasť [1].



Obrázok 5.3 Hybridný LOS systém s užívateľskými terminálmi

Smerové LOS spojenia dosahujú vysokú energetickú účinnosť využitím úzkeho lúča vysielača a úzkeho zorného poľa FOV prijímača. Smerové LOS spojenia je treba zamerať pred použitím a vyžadujú nepretržitú priamu viditeľnosť medzi vysielačom a prijímačom. Možno povedať, že sú vhodnejšie pre spojenia bod-bod ako pre spojenia bod-viac bodov, teda je znížená ich flexibilita. Výsledkom tejto techniky bezdrôtového optického prenosu je minimalizácia útlmu a maximalizácia energetickej účinnosti. Hlavnou nevýhodou tejto techniky je nedostatok mobility a citlivosť na blokovanie spojenia. Pri úzkych lúčoch môžu vzniknúť tiež problémy súvisiace s polohovaním vysielača a prijímača. Šírka lúča by mala byť zvolená taká, aby každý aj neskúsená osoba obsluhujúca takýto systém bola schopná ručne zamerať prijímač k vysielaču. Smerová LOS topológia je najznámejšia, bola používaná mnoho rokov s nízkou prenosovou rýchlosťou na simplexne diaľkové ovládanie aplikácií pre domáce elektrické zariadenia. Navyše smerová LOS konfigurácia je zvolená pre IrDA spojenia, ktoré ponúkajú jednoduché spojenia typu bod-bod pre sieťovú komunikáciu [1, 3, 4].



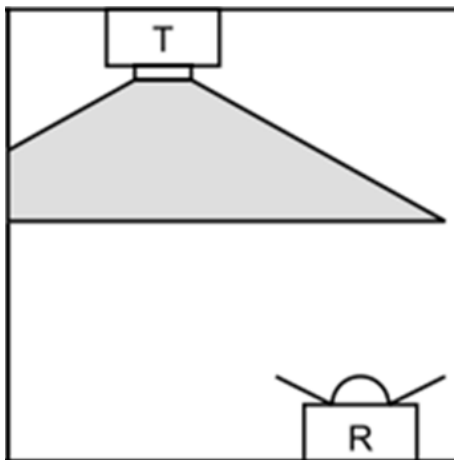
Obrázok 5.4: Smerový LOS systém

V systéme smerovo orientovaného lúča LOS optický lúč putuje priamo bez odrazov od vysielača k prijímaču ako je znázornené na Obrázku 5.4. Terminály T1 a T2 môžu zastupovať úlohu vysielajúceho aj prijímacieho zariadenia.

### 5.1.2 Nesmerové LOS systémy

Nesmerové LOS systémy využívajú široký lúč vysielača a prijímač so širokým zorným poľom. To umožňuje dosiahnuť lepšie pokrytie priestoru a eliminovať potrebu namierenia vysielača a prijímača presne na seba (Obrázok 5.5). V porovnaní so smerovým LOS systémom sú tieto výhody dosiahnuté na úkor zníženia intenzity ožiarenia pre daný rozsah a prenosový výkon. Použitie širokohlých vysielačov a prijímačov znamená, že časť prijímaného signálu môže byť podrobená jednému alebo viacerým odrazom od stien a objektov v miestnosti. Pretože väčšina energie dopadajúcej na detektory svetelného žiarenia využíva cestu s priamym výhľadom, nesmerové LOS spojenia sú stále náchylné k zablokovaniu. V nesmerových LOS spojeniach je signál ovplyvnený nechceným okolitým svetlom. Prijímač so širokým zorným poľom prijíma nechcené okolité svetlo spolu s požadovaným signálom. Spôsob ako odstrániť tento problém je v zavedení optických šošoviek medzi vysielača a prijímača. Tieto šošovky poskytujú optický zisk požadovaného signálu a iné signály rôznych vlnových dĺžok sú blokované. Nesmerové LOS spojenia sú vhodné pre aplikácie, pri ktorých je vysielanie typu bod-viac bodov. Typickým scenárom pre tento systém je prístupový bod umiestnený

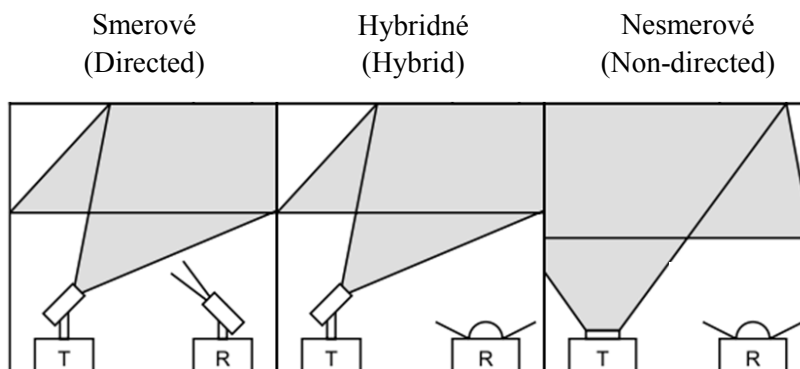
na strop v miestnosti, poskytujúci konektivitu mobilným zariadeniam v rámci svojej oblasti pokrytia [5, 6].



Obrázok 5.5: Nesmerový LOS systém

## 5.2 Systémy s nepriamou viditeľnosťou non-LOS (difúzne)

Opačným prípadom LOS systémov sú systémy s nepriamou cestou, teda systémy non-LOS pri ktorých vysielateľ komunikuje s prijímačom na základe difúzných odrazov od stropu a stien alebo ich kombináciou v miestnosti (Obrázok 5.6) [4]. V nasledujúcom obrázku je nepriama cesta medzi vysielateľom (T) a prijímačom (R), jedná sa teda o režim non-LOS. Optický lúč sa pred dosiahnutím prijímača odráža od stropu a stien v miestnosti.



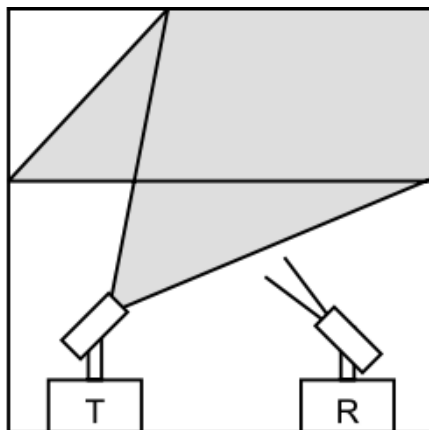
Obrázok 5.6: Techniky s nepriamou viditeľnosťou non-LOS

### 5.2.1 Smerové non-LOS systémy

Pri smerových non-LOS systémoch vysielateľ vysiela úzky lúč smerom k stropu prípadne stenám od ktorých sa odráža, tento odrazený signál zachytáva prijímač s úzkym FOV namierený na strop ako je vidieť na Obrázku 5.7. Toto úzke pole prijímača zamietne väčšinu viaccestných skreslení a poskytujú spojenia s lepšou šírkou pásma aj keď sú viac citlivé na tienenie vzhľadom k difúznym spojeniam. Je tu však potreba zamerania prijímača na miesto pokrytia na strop. Tento



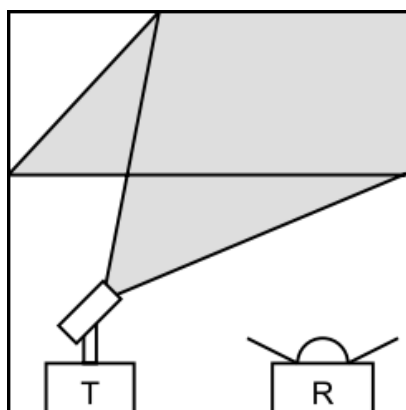
systém minimalizuje počet viaccestných odrazov od povrchu v miestnosti a dosahuje nižšie prenosové straty, čo vedie k menšiemu vysielanému výkonu než má obvyklý difúzny systém zo širokým lúčom [1].



Obrázok 5.7: Smerový non-LOS systém

### 5.2.2 Hybridné non-LOS systémy

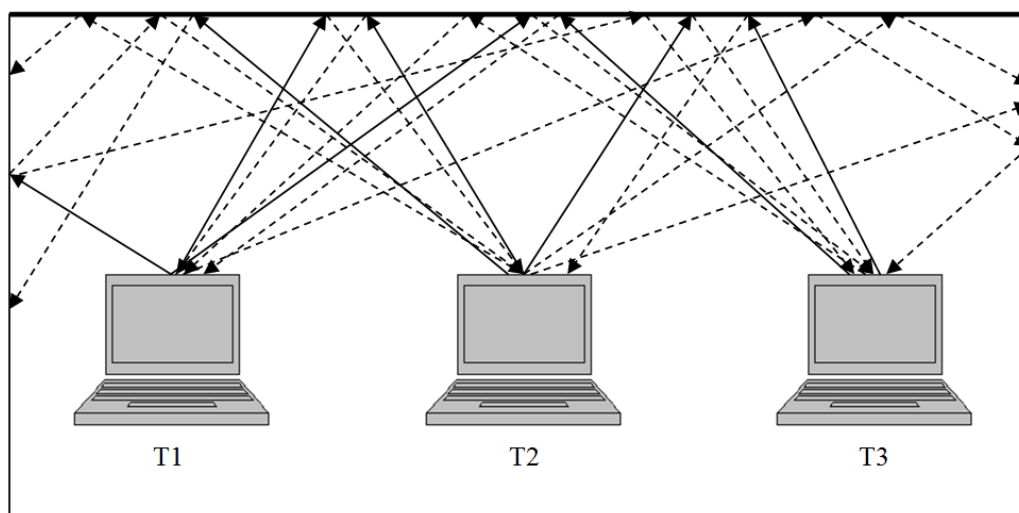
Hybridné systémy predstavujú ďalší typ konfigurácie zo skupiny nepriamych spojení non-LOS. Vznikli kombináciou smerových a nesmerových non-LOS systémov. Vysielač v tomto systéme vysiela úzky lúč smerom k stropu, prípadne i stenám v miestnosti tak ako je nasmerovaný. Tento lúč sa od nich a objektov v miestnosti odráža a dopadá na prijímač zo širokým FOV (Obrázok 5.8). Prijímač podobne ako pri nesmerových LOS spojeniach prijíma požadovaný signál spoločne s nechceným okolitým svetlom, takže sa tak isto zavádzajú optické šošovky medzi vysielač a prijímač na odstránenie tohto problému. V porovnaní zo smerovým non-LOS systémom prijímač nemusí byť presne nastavený na oblasť pokrytia vysielaným signálom na strope, keďže sa tu jedná o prijímač zo širokým FOV. V hybridných non-LOS systémoch blokovanie spojenia nepredstavuje problém, ale tieto systémy trpia viaccestným skreslením. Toto skreslenie sa zvyšuje spolu so zvýšením oblasti pokrytia [7, 8].



Obrázok 5.8: Hybridný non-LOS systém

### 5.2.3 Nesmerové non-LOS systémy

Tento systém je známy aj pod pojmom difúzny systém. Pri smerovo neriadených spojeniach non-LOS difúzny vysielač vysiela široký lúč zvislo nahor smerom k stropu. Prijímač zo širokým zorným poľom (FOV) prijíma signál odrazený raz alebo viackrát od stropu, stien a objektov v miestnosti. Optický lúč sa odráža difúzne do všetkých smerov a vyplňa tak celý priestor miestnosti, čo umožňuje vyhnúť sa prekážkam a zaistiť tak odolnosť proti tieňovaniu a zablokovaniu lúčov. Táto konfigurácia je však náchylná na zvýšenie strát na vedeniach a po mnohosmerných odrazoch je obmedzená prenosová rýchlosť. Ďalej rýchlosť závisí v tejto konfigurácii od veľkosti miestnosti a koeficientov odrazových plôch v miestnosti. Vzhľadom k veľmi vysokým stratám vo voľnom priestore difúzny systém vyžaduje veľký výkon pre pokrytie danej oblasti. Problémom v tejto technike je viacestná disperzia. Ak sa krátkodobý impulz prenáša v širokom uhle, teda prechádza viacerými cestami, impulz sa rozšíri. Tento efekt je známy ako viacestná disperzia. To spôsobuje medzisymbolová interferencia (ISI) pri vyšších prenosových rýchlostiach alebo vo väčšom bunkovom systéme. Z pohľadu užívateľa je nesmerová non-LOS topológia najvhodnejšia, pretože nevyžaduje žiadne polohovanie vysielačov a prijímačov a ani zachovanie priamej viditeľnosti (LOS) medzi nimi. Okrem toho je tiež táto konfigurácia veľmi flexibilná a môže byť použitá pre infraštruktúru aj ad hoc siete [1, 4, 5, 9].



Obrázok 5.9: Nesmerový non-LOS (difúzny) systém

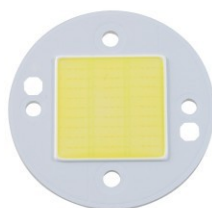
Na Obrázku 5.9 je znázornená komunikácia medzi užívateľskými terminálmi, kde sa dáta posielajú prostredníctvom širokouhlých optických signálov smerom k stropu a po jednom alebo viacerých odrazoch signály dopadajú na terminály alebo sa strácajú v prostredí.

## 6 Experimentálne overenie pokrytia priestoru

Pred experimentálnym overovaním pokrytia priestoru sa zmerali smerové charakteristiky LED diód. Tieto LED diódy sa použili ako vysielачe pri pokrytí priestoru. Typy použitých LED diód spolu s jednotlivými údajmi o nich sú uvedené v nasledujúcej podkapitole. Zvyšné namerané smerové charakteristiky pre jednotlivé diódy sú uvedené v Prílohe A.

### 6.1 Použité typy LED diód

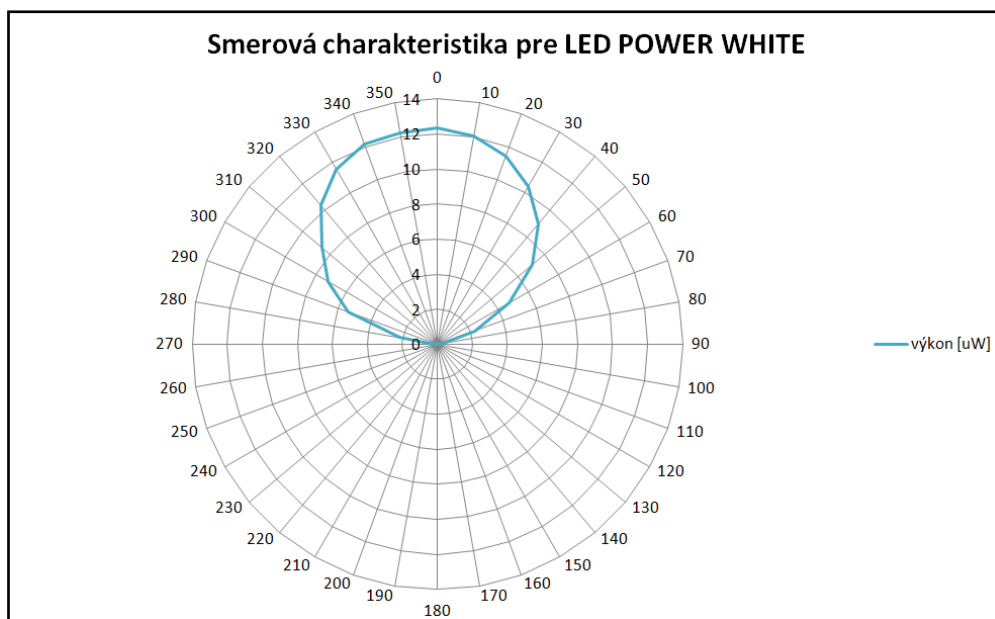
#### LED dióda POWER WHITE



Obrázok 6.1: Biela výkonová LED dióda

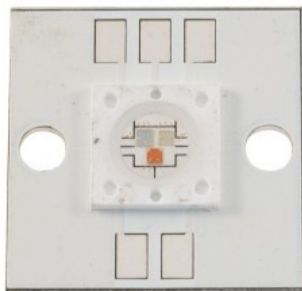
Tabuľka 6.1: Vybrané technické parametre LED POWER WHITE

Parameter	Hodnota	Jednotka
Vyžarovací uhol	120	[°]
Svetelný tok	500	[lm]
Vyžiarený výkon	5	[W]
Teplota svetla	6000	[K]
Napájacie napätie	9,6	[V]



Obrázok 6.2: Nameraná smerová charakteristika bielej výkonovej LED diódy

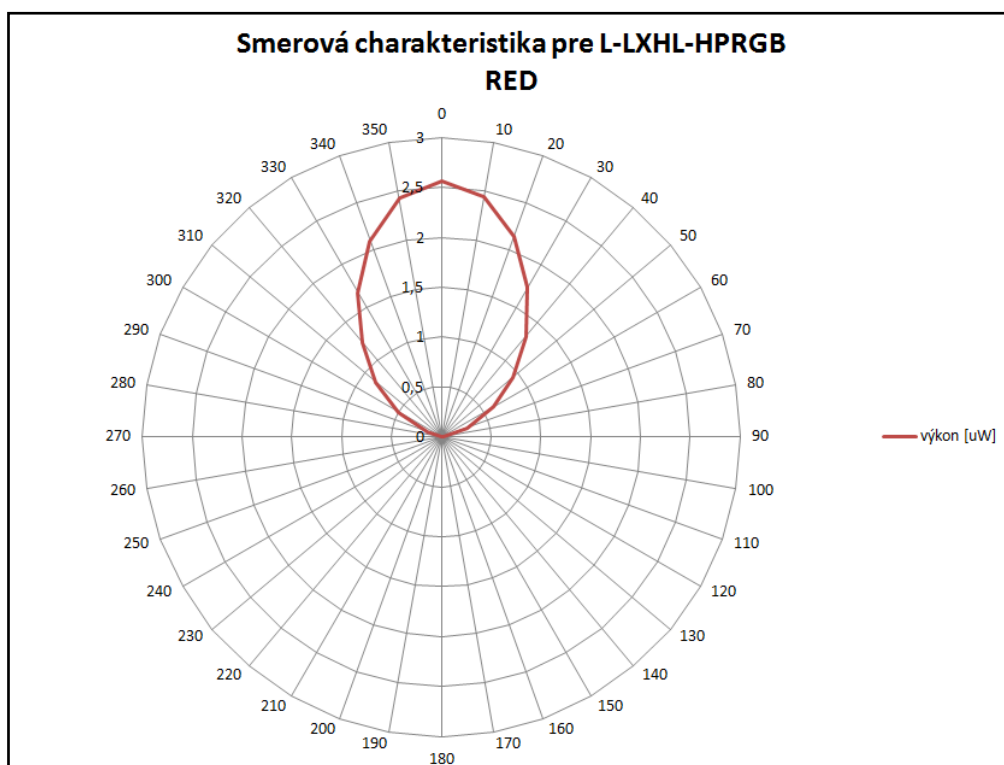
## LED dióda L-LXHL-HPRGB



Obrázok 6.3: RGB výkonová LED dióda

Tabuľka 6.2: Vybrané technické parametre LED L-LXHL-HPRGB

Parameter	Hodnota	Jednotka
Farba svetla	RGB	[-]
Vyžarovací uhol	120	[°]
Svetelný tok	41	[lm]
Vyžiarený výkon	5,1	[W]
Napájacie napätie	2,2/3,5/3,5	[V]



Obrázok 6.4: Nameraná smerová charakteristika pre červenú farbu

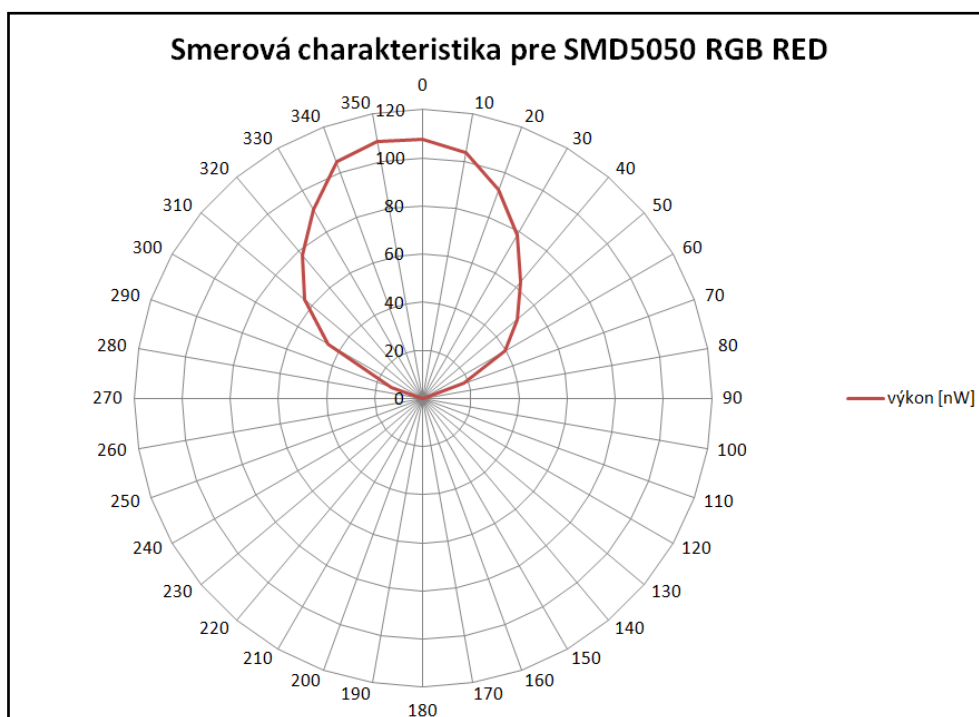
## LED dióda SMD5050 RGB



Obrázok 6.5: SMD5050 RGB LED dióda

Tabuľka 6.3: Vybrané technické parametre LED SMD5050 RGB

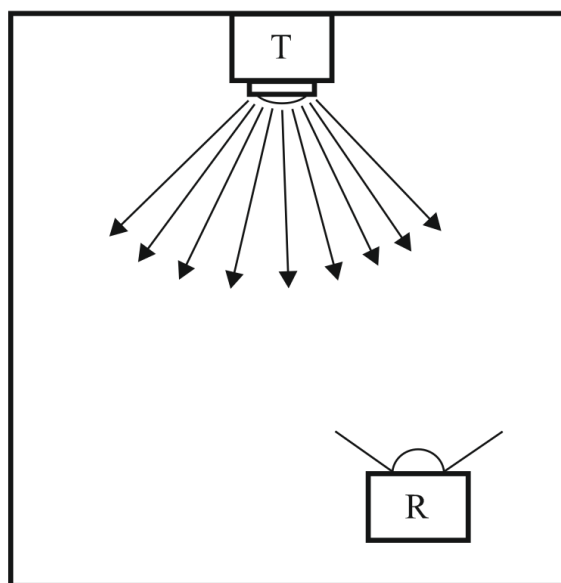
Parameter	Hodnota	Jednotka
Farba svetla	RGB	[-]
Vyžarovací uhol	120	[°]
Svetelný tok	19-22	[lm]
Vyžiarený výkon	0,2	[W]
Napájacie napätie	2-3,6	[V]



Obrázok 6.6: Nameraná smerová charakteristika pre červenú farbu

## 6.2 Pokrytie priestoru u vybraného systému

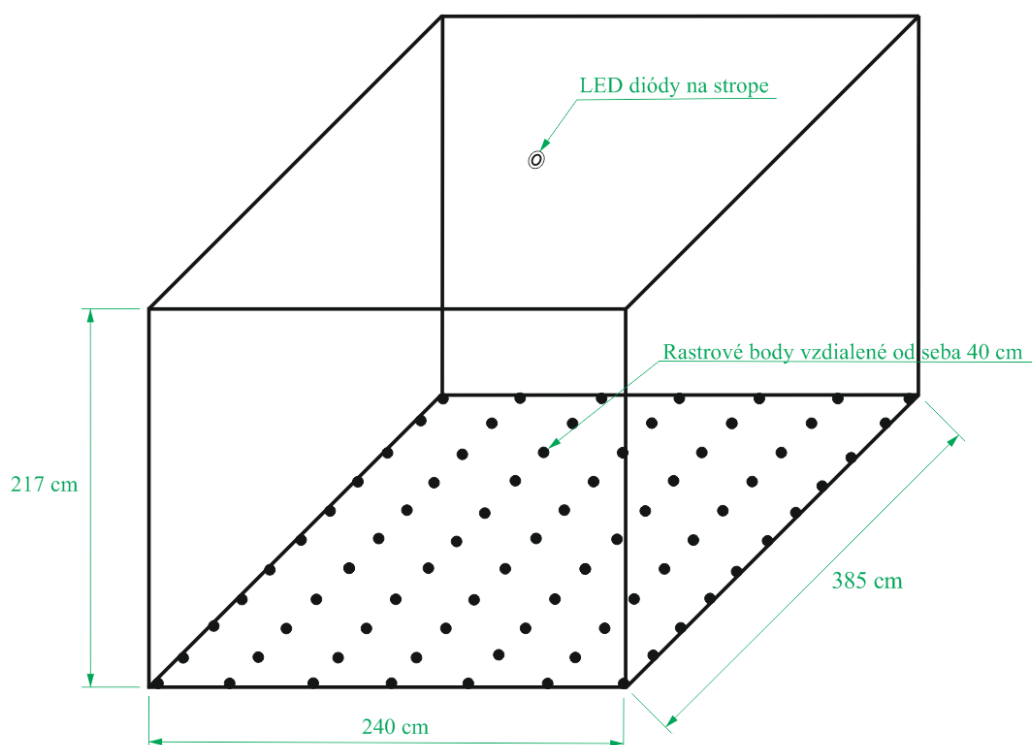
Pre overenie pokrytia priestoru bol použitý nesmerový LOS systém zobrazený na Obrázku 6.7. Kde vysielateľ (T) bol umiestnený v strede miestnosti na strope. Pokrytie priestoru sa overovalo dvoma typmi vysielateľov a to bodovým zdrojom svetla a LED pásikom. Ako bodový zdroj svetla bola zvolená pre svoje parametre biela výkonová LED dióda (LED POWER WHITE). Táto LED dióda sa po odmeraní pokrytia nahradila LED pásikom. Pásik bol zložený z LED diód SMD5050 RGB o dĺžke jeden meter. Prijímač (R) bol v tomto prípade optický senzor napojený na merač optického výkonu.



Obrázok 6.7: Nesmerový LOS systém vybraný pre overenie pokrytia

Pri meraní pokrytia priestoru a distribúcie svetla v miestnosti bolo potrebné eliminovať okolité svetlo, ktoré by bolo zdrojom šumu. Bez odstránenia okolitého svetla by boli namerané hodnoty ovplyvnené významnou chybou. Toto eliminovanie okolitého svetla bolo zabezpečené použitím temnej miestnosti v ktorej sa meranie uskutočňovalo. Ďalej pri meraní bolo potrebné mať na sebe tmavé oblečenie aby sa svetlo neodrážalo od oblečenia a neovplyvňovalo merané hodnoty.

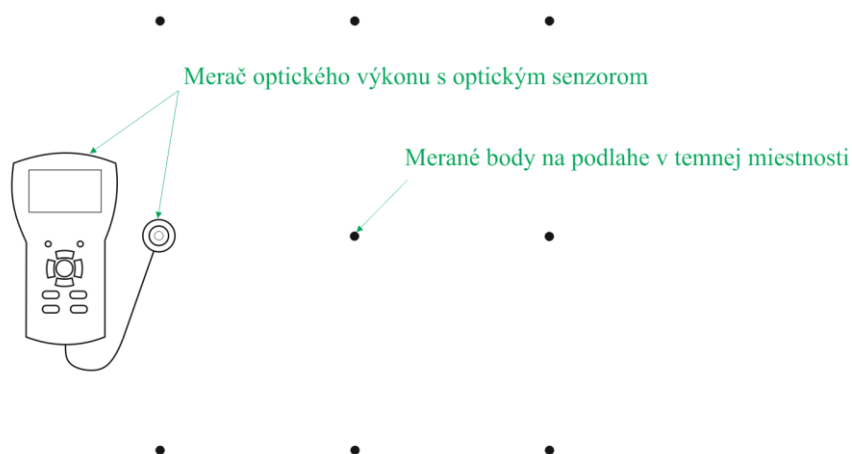
**Temná miestnosť** je špeciálna miestnosť skonštruovaná priamo za účelom zatemnenia. Jedná sa o miestnosť postavenú v klasickej miestnosti. Temná miestnosť má vo vnútri všetky steny, podlahu a strop čiernej farby pre zamedzenie odrazov lúčov od stien a nie je v nej nič čo by mohlo byť zdrojom svetla a prekážok pri meraní pokrytia priestoru miestnosti.



Obrázok 6.8: Rozmery temnej miestnosti

Na Obrázku 6.8 sú zobrazené rozmery temnej miestnosti, nákras umiestenia LED diód a meraných rastrových bodov. Rastrové body na podlahe v miestnosti boli od seba vzdialené 40 cm a slúžili ako značky pre miesta merania optického výkonu.

Schéma merania je zobrazená na Obrázku 6.9. Nachádza sa na nej merač optického výkonu s optickým senzorom a znázornené body na ktorých prebiehalo meranie optického výkonu. Celkovo prebiehalo toto meranie na 77 bodoch v miestnosti pre oba dva typy LED diód. Namerané hodnoty optického výkonu na jednotlivých bodoch a pre jednotlivé LED diódy sú uvedené v prílohe na priloženom CD.



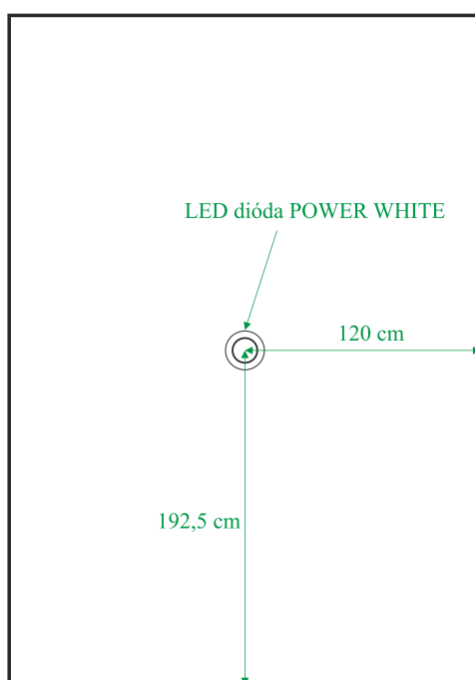
Obrázok 6.9: Schéma merania

**Použité meracie prístroje:**

- merač optického výkonu THORLABS PM100 SN: M00219695
- optický výkonový senzor THORLABS S120B 400-1100nm SN: 08091606

**6.2.1 Pokrytie priestoru LED diódou POWER WHITE**

LED dióda POWER WHITE bola pri tomto meraní pokrytia temnej miestnosti optickým výkonom bieleho svetla umiestnená v strede stropu. Hodnota inštalovaného výkonu LED diódy POWER WHITE bola 5 W. Na Obrázku 6.10 je zobrazené presné umiestnenie LED diódy a jej vzdialenosť od stien miestnosti.

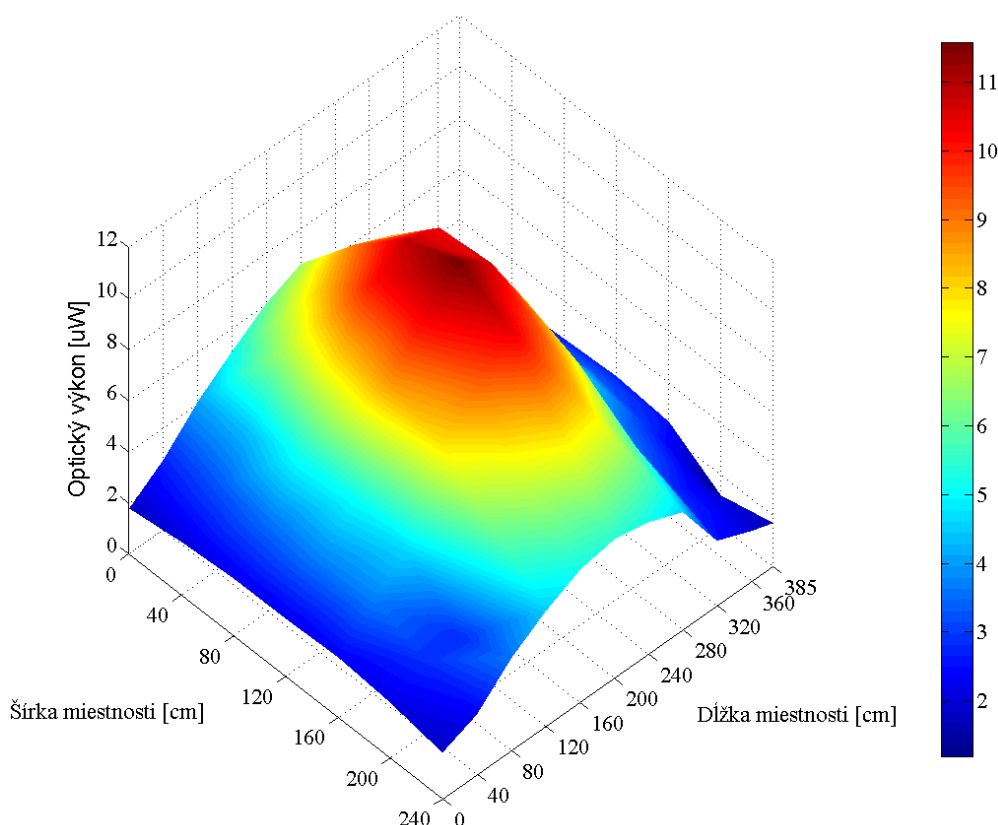


*Obrázok 6.10: Umiestnenie bielej výkonovej LED diódy na strope v miestnosti*

**Analýza nameraných hodnôt**

Graf pokrytia priestoru miestnosti LED diódou POWER WHITE je zobrazený v nasledujúcom obrázku (Obrázok 6.11). Z grafu pokrytia priestoru možno vidieť, že najlepšie pokrytie má stred miestnosti a pokrytie pri kratších stenách už nie je také silné. Takže najväčší nameraný optický výkon bol priamo pod umiestneným LED diódou. Hodnoty optického výkonu sa tu pohybovali okolo  $11 \mu\text{W}$ . Najväčšia hodnota ktorá tu bola nameraná mala hodnotu  $11,58 \mu\text{W}$ . So zväčšujúcou sa vzdialenosťou od umiestnenia LED diódy sa hodnoty optického výkonu postupne znižovali. Čo je dané tým, že optický výkon sa po zdvojnásobení vzdialenosti medzi vysielačom a prijímačom zníži o štvrtiny ako to je popísané v Kapitole 4.3. Najmenšie hodnoty optického výkonu boli namerané pri kratších stenách temnej miestnosti, kde sa pohybovali okolo  $2 \mu\text{W}$  a v rohoch okolo  $1,7 \mu\text{W}$ . Rozdiel medzi najväčšou a najmenšou nameranou hodnotou optického výkonu predstavuje  $9,8 \mu\text{W}$ . Priemerná hodnota nameraného optického výkonu je  $5,14 \mu\text{W}$ .





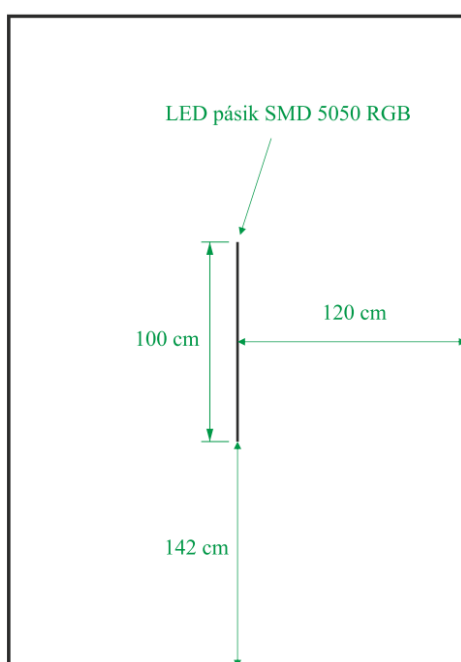
Obrázok 6.11: Graf pokrytia priestoru výkonnou LED diódou POWER WHITE

### 6.2.2 Pokrytie priestoru LED pásikom SMD 5050 RGB

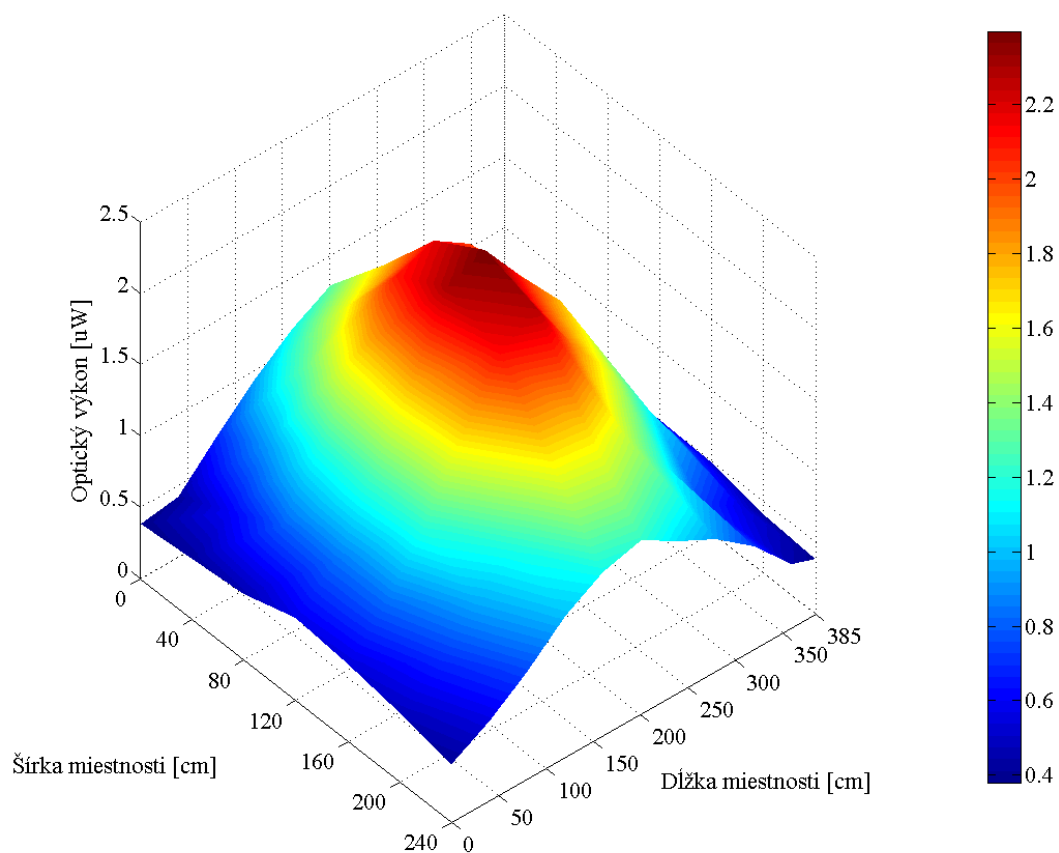
Pokrytie priestoru sa v tomto prípade overovalo LED pásikom zloženého z LED diód SMD 5050 RGB. Na LED pásiku o dĺžke jeden meter bolo rozmiestnených 30 LED diód SMD 5050 RGB s hodnotou inštalovaného výkonu 7,2 W. Umiestnenie LED pásiku na strop aj so vzdialenosťami od stien je zobrazené na Obrázku 6.12. LED pásik je umiestnený v strede stropu miestnosti a zároveň rovnobežne s dlhšími stenami miestnosti. Farba svetla vyžiareného z LED pásiku bola biela tak ako v predchádzajúcom prípade pri výkonovej LED dióde.

#### Analýza nameraných hodnôt

Na obrázku 6.13 je zobrazený graf pokrytia priestoru LED pásikom SMD 5050 RGB. Opäť možno vidieť, že najväčšie pokrytie je pod umiestneným LED pásikom, čiže stred miestnosti je najlepšie pokrytý bielym svetlom. Najväčšia nameraná hodnota optického výkonu bola  $2,39 \mu\text{W}$  a najmenšia hodnota  $0,38 \mu\text{W}$ . Priemerná hodnota optického výkonu  $1,09 \mu\text{W}$ . Najmenej pokryté priestory miestnosti boli opäť miesta pri kratších stenách a rohy. Pokrytie priestoru temnej miestnosti je v tomto prípade rovnomernejšie ako pri použití bodového zdroja svetla. Rozdiel medzi najmenšou a najväčšou nameranou hodnotou optického výkonu nie je taký veľký ako pri bielej výkonovej LED dióde. Na druhej strane však intenzita osvetlenia vyžiarená z LED pásika je oveľa menšia ako pri bielej výkonovej LED dióde.



Obrázok 6.12: Umiestnenie LED pásiku SMD 5050 RGB na strope v miestnosti



Obrázok 6.13: Graf pokrytia priestoru LED pásikom SMD5050 RGB

---

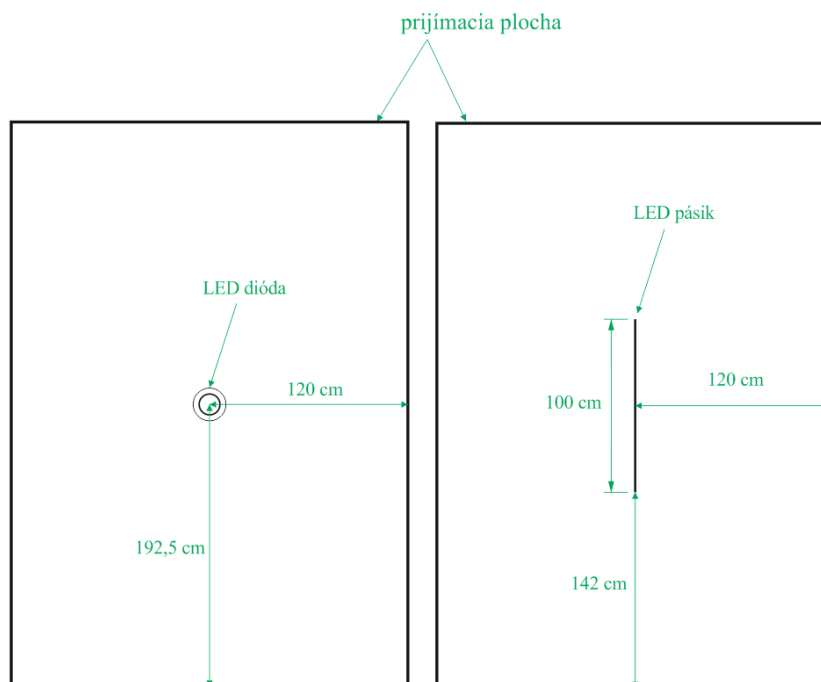
## 7 Softwarová simulácia pokrytia priestoru

Simulácia pokrytia priestoru sa vytvárala pomocou softwaru LightTools. LightTools je software pre modelovanie a simulácie optických systémov. Môže byť použitý na vytváranie virtuálnych prototypov optických systémov pre široké spektrum aplikácií.

Pri vytváraní simulácie bolo potrebné vytvoriť a nastaviť jednotlivé parametre a komponenty v softvare LightTools. Vytvorila sa plocha o rozmeroch temnej miestnosti, ktorá slúžila ako prijímacia plocha pokrytia intenzitou osvetlenia. Nastavila sa vzdialenosť prijímacej plochy od vysielача o veľkosti výšky temnej miestnosti. Ako bodový vysielач bola vybratá z knižnice LED dióda s rovnakými parametrami ako bola biela výkonová LED dióda pri meraní pokrytia priestoru temnej miestnosti. Po týchto nastaveniach sa spustila simulácia pokrytia. Pri simulácii LED pásika bolo nastavenie podobné, len sa zmenil typ vysielача. LED pásik sa vytvoril z tridsiatich LED diód rozmiestnených vedľa seba s parametrami aké mali LED diódy SMD5050 RGB.

### 7.1 Simulácia pokrytia LED diódou a LED pásikom

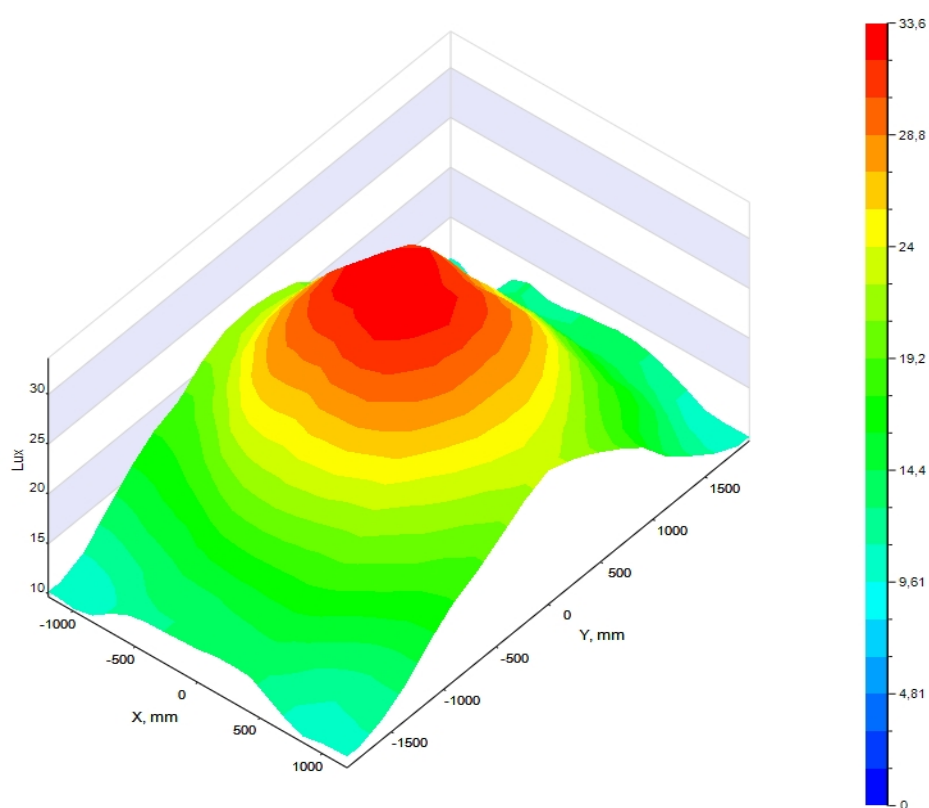
LED dióda a LED pásik boli vložené na začiatok súradníc v softvari LightTools tak, aby boli v strede nad prijímacou plochou ako to je zobrazené na Obrázku 7.1. Na obrázku sú zobrazené aj vzdialenosti umiestnenia LED diódy a LED pásiku od krajov prijímacej plochy. Jednotlivé hodnoty zo simulácie sú uvedené v prílohe na priloženom CD.



Obrázok 7.1: Umiestnenie LED diódy a LED pásika pri simulácii

### 7.1.1 Analýza hodnôt získaných simuláciou pokrytia LED diódou

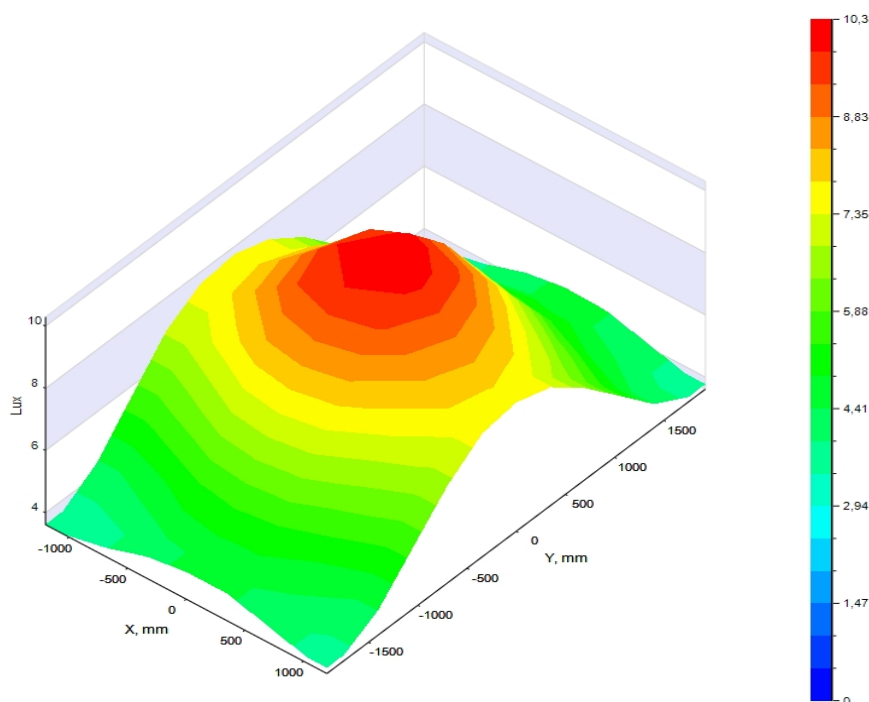
Nasimulované pokrytie priestoru LED diódou je na Obrázku 7.2. Graf zobrazuje intenzitu osvetlenia vyžiareného z LED diódy, ktorá dopadá na prijímaciu plochu. Najväčšia intenzita je pod umiestneným LED diódou, takže prijímacia plocha je najlepšie pokrytá práve tu. Intenzita osvetlenia tu dosahuje hodnoty od 28,8 lux do 33,6 lux čo je najvyššia hodnota intenzity osvetlenia v grafe. Čím sa zväčšuje dĺžka medzi LED diódou a prijímacou plochou intenzita osvetlenia slabne. Najmenej osvetlené sú rohy prijímacej plochy, kde hodnoty intenzity osvetlenia sa pohybujú okolo 9,7 lux a najmenšia hodnota je 9,69 lux. Priemerná hodnota osvetlenia dopadajúceho na prijímaciu plochu je 20,64 lux. Ďalšie obrázky zo simulácie pokrytia priestoru LED diódy sú zobrazené v Prílohe B.



Obrázok 7.2: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru LED diódou

### 7.1.2 Analýza hodnôt získaných simuláciou pokrytia LED pásikom

Na Obrázku 7.3 je zobrazený graf nasimulovaného pokrytia priestoru LED pásikom. Graf zobrazuje intenzitu osvetlenia dopadajúceho na prijímaciu plochu, ktorá je v tomto prípade menšia ako pri LED dióde v predchádzajúcej simulácii. Podobne ako pri LED dióde tak aj pri LED pásiku má najintenzívnejšie pokrytie stred prijímacej plochy. Najväčšia hodnota intenzity osvetlenia tu je 10,3 lux. Najmenšie hodnoty intenzity osvetlenia okolo 4 lux sú opäť v rohoch. Najmenšia hodnota intenzity osvetlenia je 3,6 lux. Priemerná intenzita osvetlenia dosahuje hodnotu 6,58 lux. Viac obrázkov s nasimulovaným pokrytím priestoru LED pásikom je zobrazených v Prílohe B.

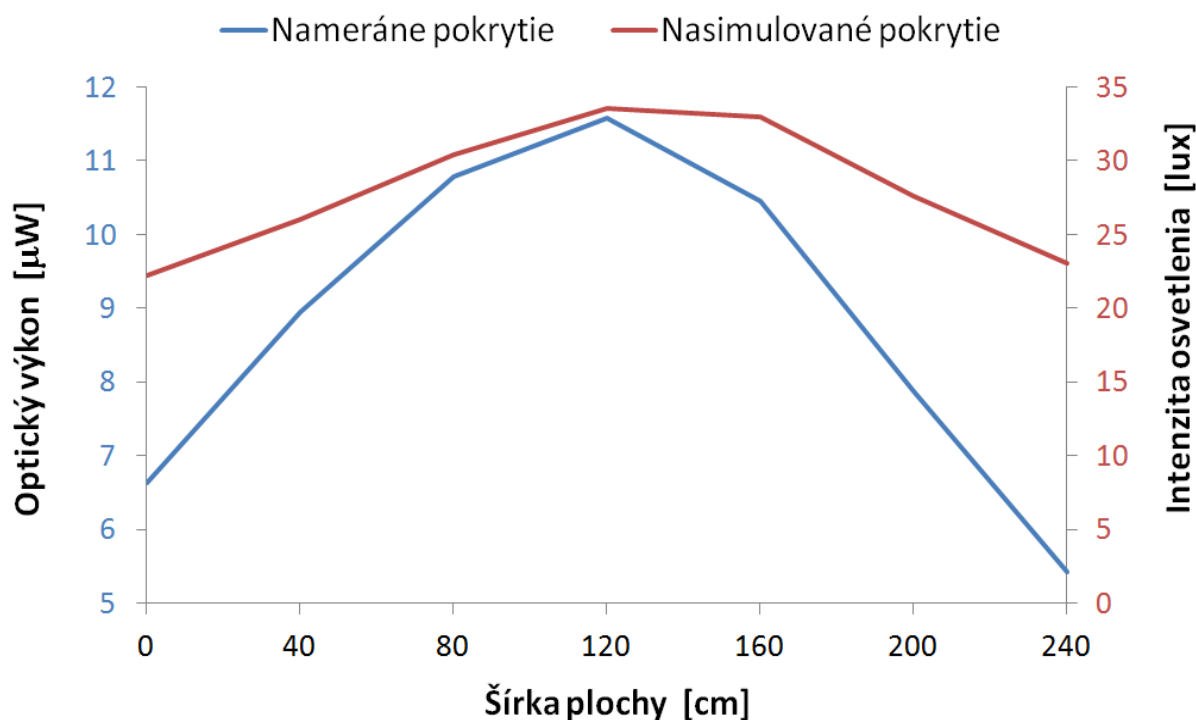


Obrázok 7.3: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru LED pásikom

## 8 Grafické porovnanie nameraných hodnôt s hodnotami SW simulácie

V porovnávaní sa vychádzalo z lineárnej závislosti nameraných a nasimulovaných hodnôt pokrytia priestoru. Využili sa pozdĺžne a priečne prierezy nameraných a nasimulovaných grafov pokrytia priestoru. Tieto hodnoty nachádzajúce sa v jednotlivých prierezoch boli vynesené do grafov. Grafy obsahujú dve zvislé osy. Jednu pre optický výkon (obsahuje hodnoty z merania) a druhú pre intenzitu osvetlenia (obsahuje hodnoty zo simulácie). Porovnávané sú najprv pokrytia priestoru bodovým zdrojom, teda LED diódou a potom pokrytia priestoru LED pásikom. Hodnoty jednotlivých priebehov v grafoch sú v prílohe na priloženom CD.

### 8.1 Porovnanie pokrytí priestoru LED diódou

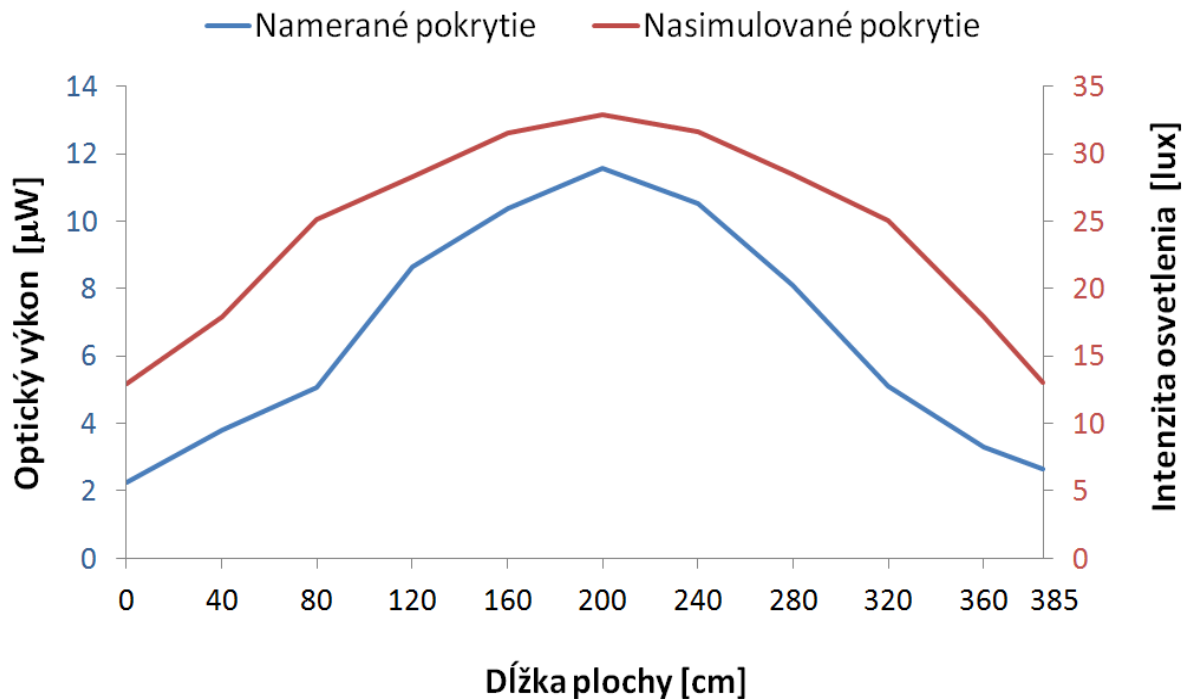


Obrázok 8.1: Graf porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím priestoru LED diódou cez šírku plochy

#### Analýza porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím cez šírku plochy

Na Obrázku 8.1 je zobrazený graf porovnania medzi nameranými a nasimulovanými hodnotami pokrytia priestoru cez šírku plochy. Ako je možno vidieť nasimulované hodnoty a teda aj pokrytie je rovnomernejšie ako namerané pokrytie v temnej miestnosti. Priebeh nameraného pokrytia stúpa od krajov plochy do jej polovice strmšie ako u nasimulovaného a pokrytie je málo rovnomerné. Pri nameranom pokrytí sa od seba odlišujú aj hodnoty optického výkonu na krajoch plochy, pri hodnote 0 cm je  $6,63 \mu\text{W}$  a pri hodnote 240 cm je  $5,43 \mu\text{W}$ . U nasimulovaného pokrytia sú tieto hodnoty po krajoch približne rovnaké a to pri 0 cm je intenzita osvetlenia 22,2 lux a pri 240 cm je

intenzita osvetlenia 23 lux. U nameraného priebehu je priemerná hodnota optického výkonu  $8,8 \mu\text{W}$  a u nasimulovaného je priemerná hodnota intenzity osvetlenia 28 lux .

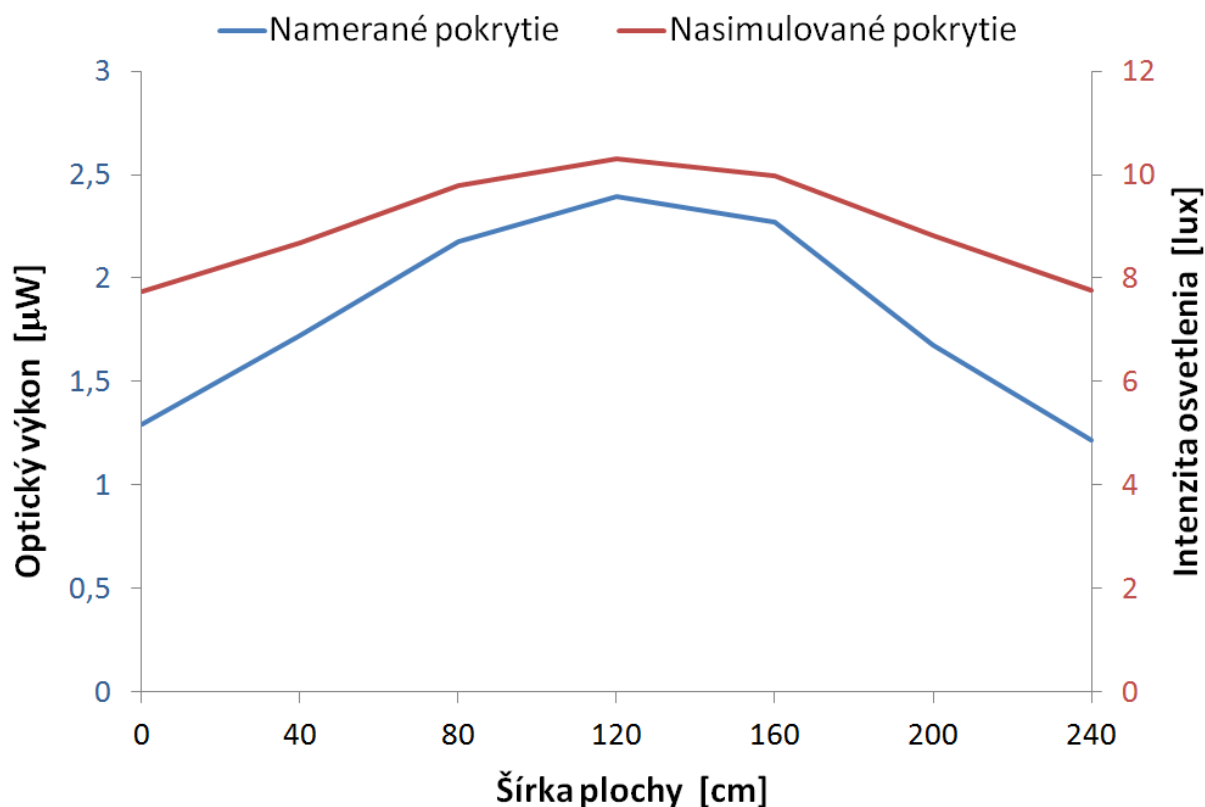


Obrázok 8.2: Graf porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím priestoru LED diódou cez dĺžku plochy

#### Analýza porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím cez dĺžku plochy

V grafe porovnania pokrytia cez dĺžku plochy zobrazenom na Obrázku 8.2 sú u nameraného a nasimulovaného pokrytia minimálne rozdiely. Pri nameranom pokrytí je vidieť, že priebeh začína byť strmší od hodnoty 80 cm, kde je hodnota optického výkonu  $5 \mu\text{W}$  a na opačnej strane od hodnoty 320 cm a hodnote optického výkonu  $5,1 \mu\text{W}$ . Naopak pri nasimulovanom pokrytí od týchto hodnôt dĺžky plochy je priebeh miernejší. Intenzita osvetlenia tu dosahuje hodnoty 25,12 lux (pri 80 cm) a 25 lux (pri 240 cm). Priemerná hodnota optického výkonu u nameraného priebehu je  $6,48 \mu\text{W}$ . Pri nasimulovanom priebehu je priemerná hodnota intenzity osvetlenia 34 lux. Minimálne hodnoty na oboch stranách dĺžky plochy sú u nameraného a aj u nasimulovaného pokrytia priestoru približne rovnaké. U nameraného to sú hodnoty optického výkonu  $2,24 \mu\text{W}$  a  $2,65 \mu\text{W}$ . U nasimulovaného hodnoty intenzity osvetlenia 12,94 lux a 13 lux.

## 8.2 Porovnanie pokrytí priestoru LED pásikom

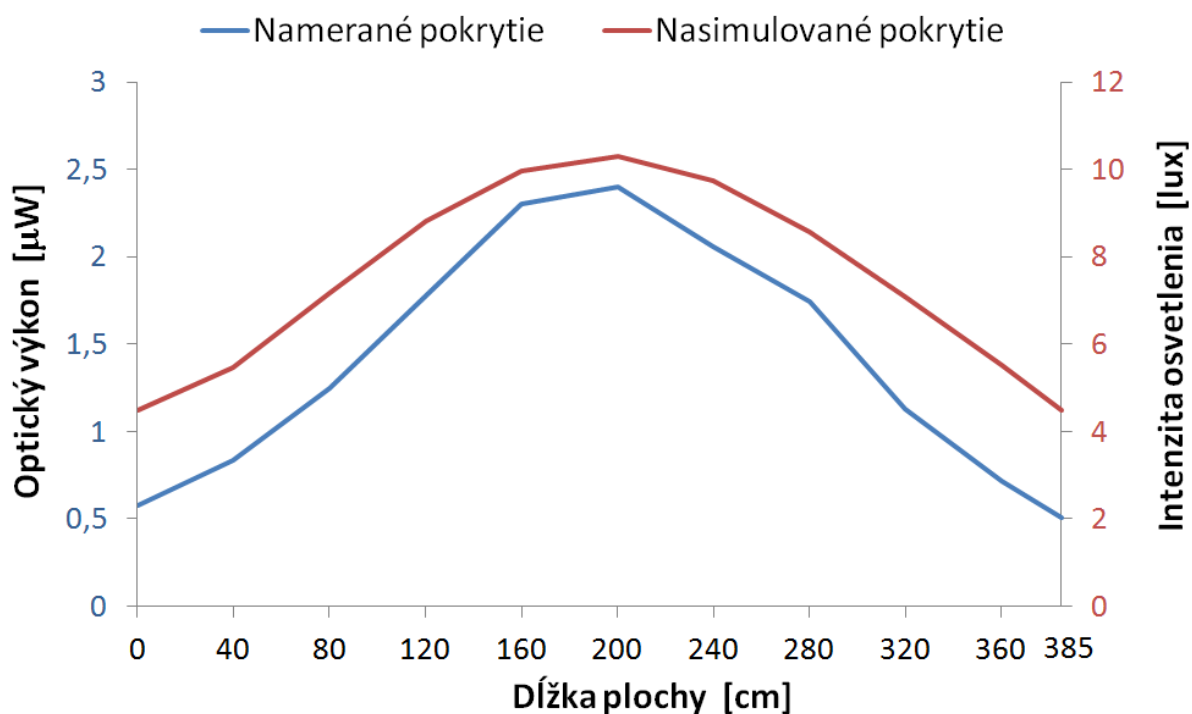


Obrázok 8.3: Graf porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím priestoru LED pásikom cez šírku plochy

### Analýza porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím cez šírku plochy

Graf porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím priestoru LED pásikom cez šírku plochy je zobrazený na Obrázku 8.3. Nasimulované pokrytie má rovnomernejší priebeh ako namerané pokrytie priestoru. Jeho priemerná hodnota intenzity osvetlenia je 9 lux. Namerané pokrytie priestoru rastie strmo od začiatku plochy na oboch stranách po hodnoty 80 cm na jednej strane a 160 cm na druhej strane. V hodnotách dĺžky plochy od 80 cm do 160 cm je namerané aj nasimulované pokrytie priestoru rovnaké. Pri nameranom pokrytí to sú hodnoty optického výkonu 2,17  $\mu\text{W}$  (pri 80 cm) a 2,27  $\mu\text{W}$  (pri 160 cm). U nasimulovaného pokrytia sú hodnoty intenzity osvetlenia 9,68 lux (pri 80) a 9,98 lux (pri 160 cm). Najmenšie hodnoty sú u oboch pokrytí nameranom aj nasimulovanom na oboch stranách približne rovnaké. U nameraného pokrytia je najmenšia hodnota optického výkonu 1,29  $\mu\text{W}$  na jednej strane plochy a 1,21  $\mu\text{W}$  na strane druhej. Priemerná hodnota optického výkonu u nameraného priebehu je 1,82  $\mu\text{W}$ . Najmenšie hodnoty intenzity osvetlenia u nasimulovaného pokrytia sú 7,75 lux na jednej strane plochy a 7,76 lux na druhej strane plochy.





Obrázok 8.4: Graf porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím priestoru LED pásikom cez dĺžku plochy

#### Analýza porovnania medzi nameraným a nasimulovaným pokrytím cez dĺžku plochy

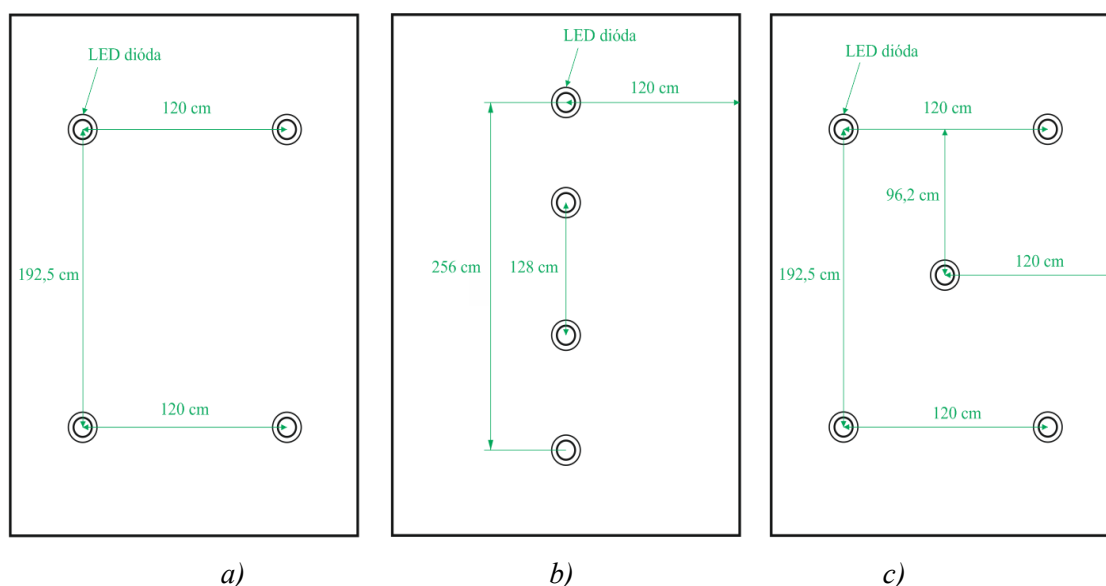
Ako možno vidieť na Obrázku 8.4 priebehy oboch pokrytí priestoru sú do hodnôt 120 cm na jednej strane a 320 cm na strane druhej rovnaké. Tak isto rovnaké priebehy sú aj medzi 160 cm a 200 cm. Nasimulovaný priebeh je však opäť rovnomernejší ako nameraný, má menšie výkyvy. U nameraného priebehu pri hodnotách 160 cm a 280 cm je nameraný optický výkon väčší a to má za následok nerovnomernosť priebehu. Hodnota optického výkonu pri 160 cm je 2,3  $\mu\text{W}$  a pri 280 cm je 1,74  $\mu\text{W}$ . Najmenšie hodnoty optického výkonu sú 0,57  $\mu\text{W}$  na jednej strane plochy a 0,50  $\mu\text{W}$  na strane druhej. U nasimulovaného priebehu sú to hodnoty intenzity osvetlenia 4,49 lux na oboch stranách. Pri nameranom priebehu je priemerná hodnota optického výkonu 1,38  $\mu\text{W}$  a pri nasimulovanom priebehu to je hodnota 7,3 lux. Namerané pokrytie je v strede plochy väčšie ako nasimulované pokrytie priestoru.

## 9 Simulácie optimalizácie pokrytia priestoru

Simulácie optimalizácie pokrytia sa vykonávala na základe pokynov vedúceho bakalárskej práce. Cieľom bolo dosiahnuť rovnomernejšie pokrytie priestoru intenzitou osvetlenia s vhodným rozmiestneným viacerých LED diód a LED pásov.

### 9.1 Simulácia optimalizácie pokrytia priestoru LED diódami

Umiestnenie LED diód pri simuláciách optimalizácie pokrytia priestoru je zobrazené spolu s rozmermi na Obrázku 9.1. Prijímacia plocha má opäť rozmery podlahy z temnej miestnosti a vzdialenosť medzi ňou a LED diódou je rovná výške temnej miestnosti. Sú tu zobrazené tri typy rozmiestnenia LED diód z ktorých sa vytvárali simulácie pokrytia priestoru. Prvým typom je rozmiestnenie štyroch LED diód tak, aby dve z nich boli rozmiestnené v strede nad jednou polovicou prijímacej plochy a ďalšie dve LED diódy nad druhou polovicou prijímacej plochy. Ďalším typom rozmiestnenia je použitie taktiež štyroch LED diód, ale v tomto prípade s rozmiestneným za sebou. Posledný návrhom optimalizácie pokrytia bola simulácia piatich LED diód, kde štyri z nich boli rozmiestnené tak ako v prvom prípade a piata dióda sa pridala na stred.



Obrázok 9.1: Umiestnenie LED diód pri simulácií - a) štyri LED diódy, b) štyri LED diódy za sebou, c) päť LED diód

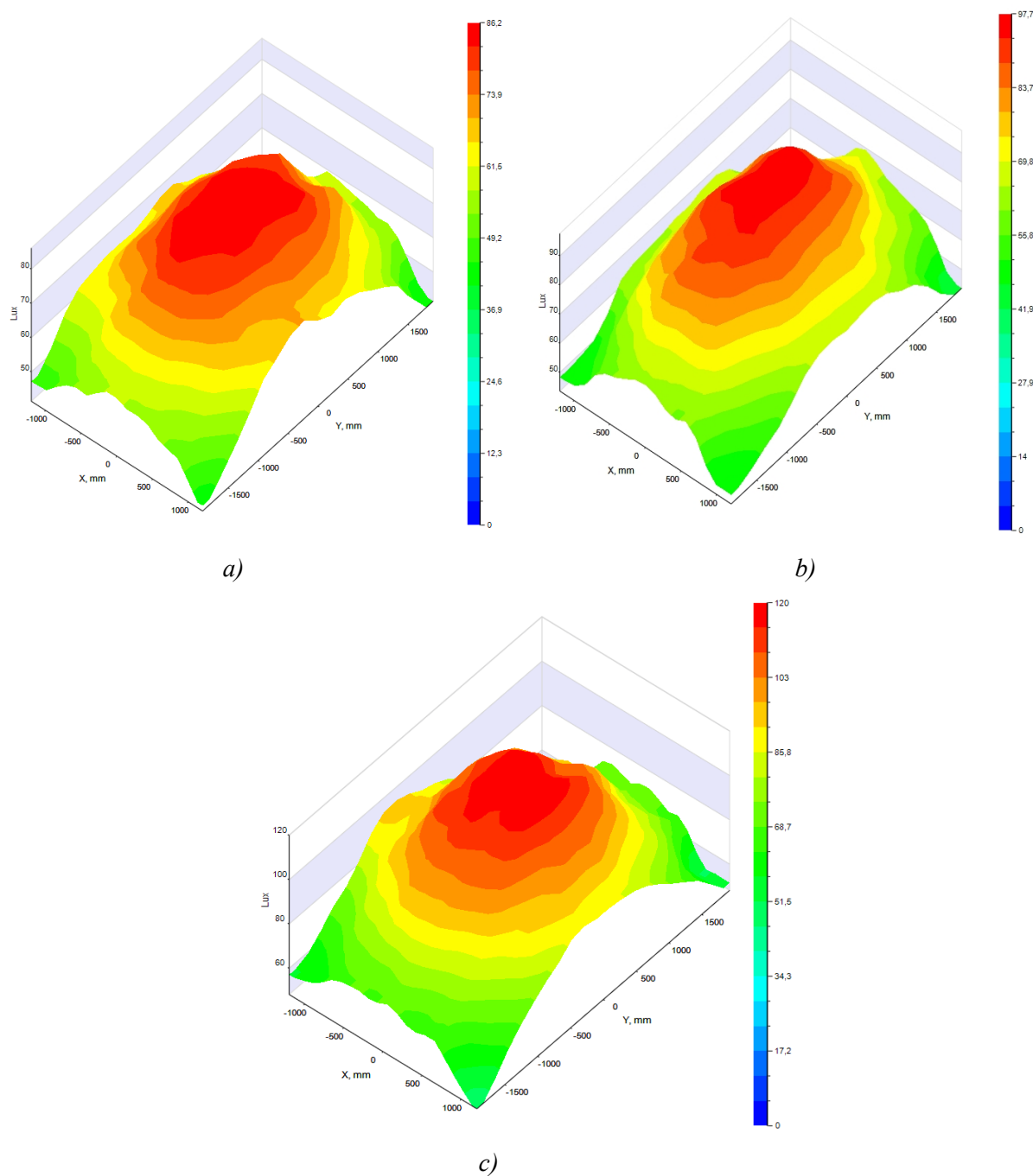
#### Analýza nasimulovaných pokrytí

Výsledné nasimulované pokrytia priestoru sú zobrazené na Obrázku 9.2. Ďalšie obrázky nasimulovaných grafov pokrytia sú v Prílohe C. Poradie nasimulovaných pokrytí je totožné ako pri umiestneniach LED diód na predchádzajúcom obrázku. Tu možno vidieť, že na obrázku a) je plocha s najväčšou nameranou intenzitou osvetlenia väčšia ako pri použití jednej LED diódy. Najväčšia nameraná intenzita osvetlenia má hodnotu 86,2 lux. Najmenšia hodnota intenzity osvetlenia je 36,9 lux. Priemerná hodnota intenzity osvetlenia je 61,6 lux.

Na obrázku b) je zobrazený graf pokrytia priestoru štyrmi LED diódami umiestnenými za sebou. V porovnaní s predchádzajúcim pokrytím je tu najväčšia intenzita osvetlenia pozdĺž prijímacej plochy, teda priamo pod umiestnenými LED diódami. Maximálna hodnota intenzity

osvetlenia je 97,7 lux a priemerná hodnota 69,8 lux. Najmenšia hodnota intenzity osvetlenia je v rohoch prijímacej plochy a to okolo 42 lux.

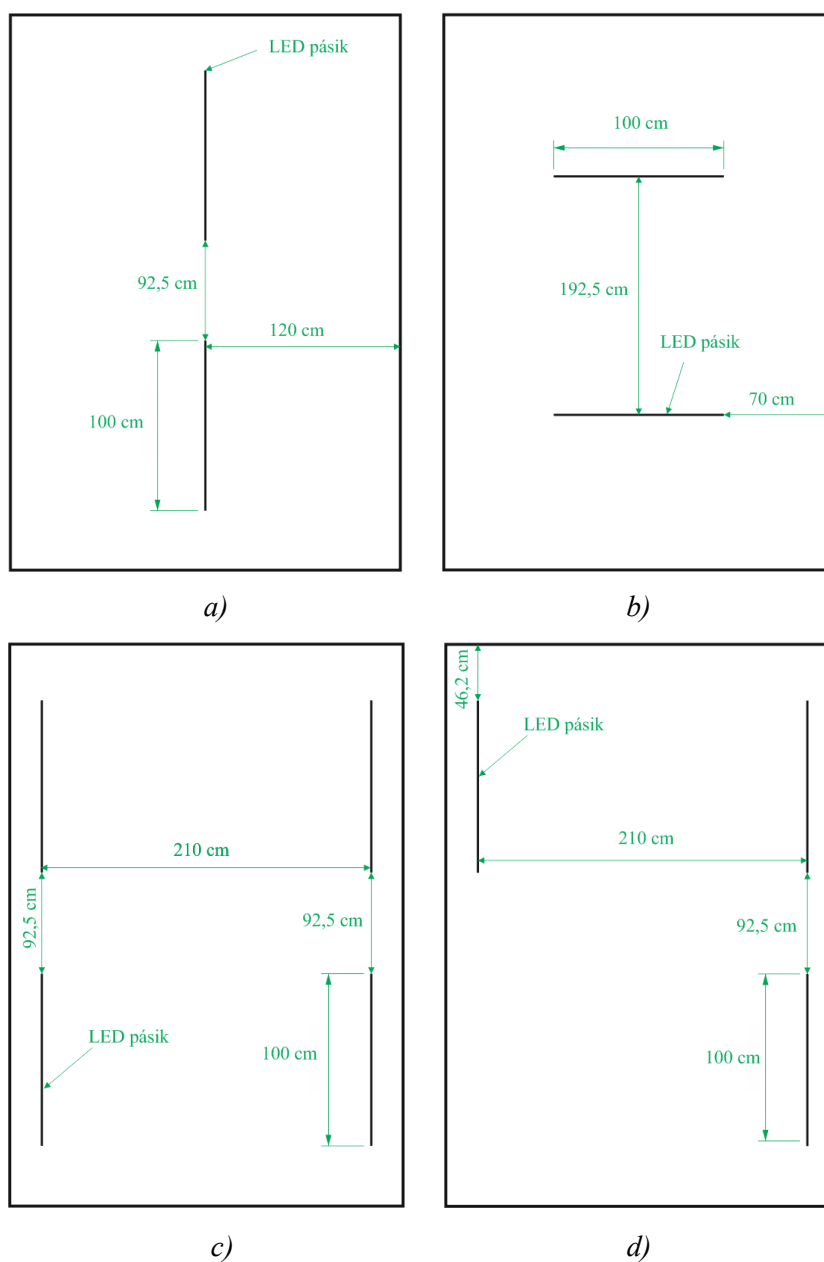
Obrázok c) obsahuje graf pokrytia priestoru s použitím piatich LED diód. Použitím piatej LED diódy umiestnenej v strede nad prijímacou plochou sa dosiahla najväčšia intenzita osvetlenia práve pod ňou a to až 120 lux. Minimálna hodnota sa zvýšila naproti prípadu a) na 51,5 lux. Taktiež aj priemerná intenzita osvetlenia vyskočila na hodnotu 85,7 lux. V tomto prípade nebolo pokrytie príliš rovnomerné.



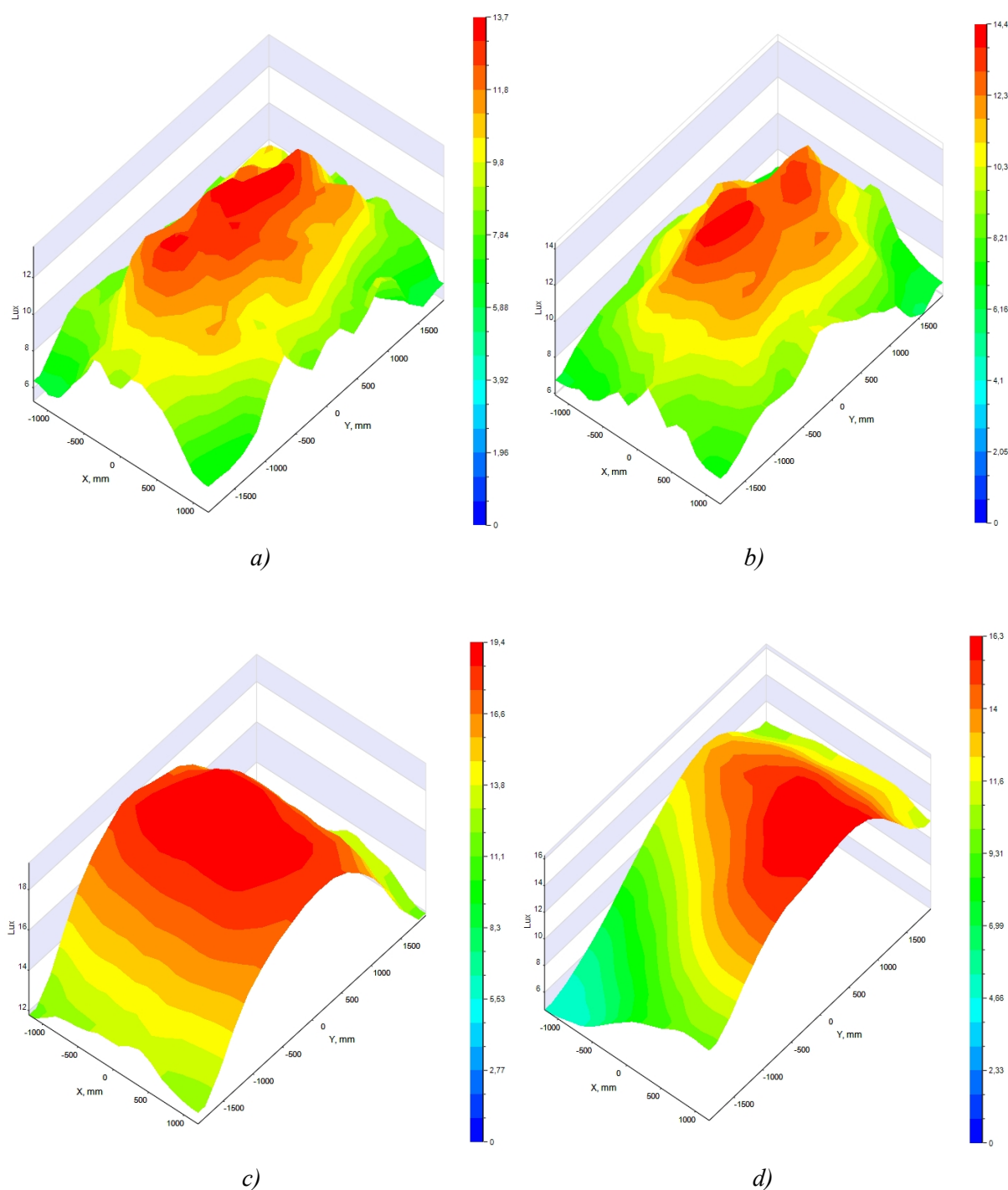
Obrázok 9.2: Nasimulované pokrytia - a) štyrmi LED diódami, b) štyrmi LED diódami umiestnenými za sebou, c) piatimi LED diódami

## 9.2 Simulácia optimalizácie pokrytia priestoru LED pásmi

Na Obrázku 9.3 je zobrazené umiestnenie LED pásov pri simuláciách optimalizácie pokrytia priestoru. V prípade a) boli použité dva LED pásiky o dĺžke jeden meter umiestnené pozdĺžne za sebou v strede nad prijímacou plochou. V prípade b) sa jednalo o totožné pásiky len otočené o  $90^\circ$ . Na obrázku c) boli umiestnené štyri LED pásiky pozdĺžne po krajoch nad prijímacou plochou. Cieľom bolo zväčšenie pokrytia v rohoch prijímacej plochy. V obrázku d) je to podobné len s tým rozdielom, že sa jeden LED pásik odstránil. Po prebehnutí simulácie by malo byť viditeľné ako ovplyvňuje toto odstránenie jedného pásika pokrytie priestoru.



Obrázok 9.3: Umiestnenie LED pásov pri simulácii - a) dva LED pásiky za sebou, b) dva LED pásiky vedľa seba, c) štyri LED pásiky po krajoch, d) tri LED pásiky po krajoch



Obrázok 9.4: Nasimulované pokrytia - a) dvomi LED pásikmi za sebou, b) dvomi LED pásikmi vedľa seba, c) štyrmi LED pásikmi po krajoch, d) tromi LED pásikmi po krajoch

### Analýza nasimulovaných pokrytí

Na predchádzajúcom obrázku sú zobrazené nasimulované pokrytia priestoru pre navrhnuté umiestnenia LED pásikov. V grafe zobrazení pokrytia a) je vidieť, že najväčšia intenzita osvetlenia 13,7 lux je dosiahnutá pod umiestnenými LED pásikmi. Takže je pokrytá väčšia plocha maximálnou intenzitou svetlenia ako pri použití jedného LED pásiku. Priemerná hodnota intenzity osvetlenia je 9,6 lux. Najmenšia intenzita osvetlenia je v rohoch a to 5,41 lux.

Pri nasimulovanom pokrytí dvoch LED pásikov vedľa seba zobrazených na obrázku b) je plocha pokrytia s najväčšou intenzitou osvetlenia podobná ako v predchádzajúcom prípade. Z grafu možno vidieť, že najväčšia hodnota intenzity osvetlenia pod umiestnenými pásikmi je 14,4 lux. Najmenšie hodnoty sa pohybovali okolo 6 lux. Priemerná hodnota intenzity osvetlenia nasimulovaného pokrytia je 10,1 lux. V porovnaní s predchádzajúcim typom, bolo pokrytie menej rovnomerné. Zatiaľ čo v predchádzajúcom prípade bolo pokrytie rovnomernejšie stredom pozdĺž prijímacej plochy v tomto prípade je toto pokrytie slabšie. Na druhej strane je tu však lepšie pokrytie strednej oblasti prijímacej plochy.

Na obrázku c) je nasimulované pokrytie priestoru so štyrmi LED pásikmi umiestnenými po krajoch nad prijímacou plochou. Úlohou tohto rozmiestnenia bolo zvýšiť pokrytie priestoru najmä v rohoch prijímacej plochy, kde vo všetkých predchádzajúcich prípadoch sú najmenšie hodnoty intenzity osvetlenia. Ako je vidieť z nasimulovaného grafu pokrytia tak sa pokrytie v týchto miestach zvýšilo na hodnotu 11,1 lux. Zároveň stým sa ale zvýšilo aj pokrytie stredu prijímacej plochy, kde najväčšia hodnota intenzity osvetlenia je 19,4 lux. Takže opäť je najväčšia intenzita osvetlenia práve tu. To je dané tým, že do rohov dopadajú intenzívne svetelné lúče vyžiarené prevažne len z jedného najbližšieho LED pásiku. Svetelné lúče vyžiarené z ostatných LED pásikov vďaka väčšej vzdialenosti majú menšiu intenzitu. V strede prijímacej plochy zasa dopadajú intenzívne lúče vyžiarené z viacerých LED pásikov a diód na ňom, takže intenzita osvetlenia je väčšia. Priemerná intenzita osvetlenia je v tomto prípade 15,2 lux.

Nasimulované pokrytie na obrázku d) zobrazuje pokrytie z troch LED pásikov umiestnených po krajoch nad prijímacou plochou. Jedná sa o to isté umiestnenie pásikov ako v predchádzajúcom prípade akurát s tým rozdielom, že tu je jeden pásik odobraný. V porovnaní s predchádzajúcim prípadom tu možno vidieť vplyv odobraného pásika na pokrytie priestoru. Najväčšia intenzita osvetlenia je v tomto prípade v strede na kraji prijímacej plochy, teda pod dvojicou umiestnených pásikov. Intenzita osvetlenia tu má hodnotu 16,3 lux. Hodnota priemernej intenzity osvetlenia je 10,5 lux. V mieste, kde je odobraný LED pásik je najmenšia hodnota intenzity osvetlenia a to až o 11,6 lux oproti maximálnej. Z tohto pokrytia je jasne vidieť, že intenzita osvetlenia klesá so zväčšujúcou sa vzdialenosťou medzi vysielateľom a prijímačom. Dobré pokrytie má približne trištvrte prijímacej plochy. V reálnom využití by to predstavovalo, že komunikácia bude prebiehať vo väčšej polovici miestnosti s minimom problémov. Rýchlosť komunikácie by tu bola oveľa vyššia ako pri komunikácii, ktorá by sa odohrávala v mieste pokrytia s nižšou intenzitou osvetlenia.

Viac obrázkov z nasimulovanými grafmi pokrytia priestoru je uvedených v Prílohe C.

---

## 10 Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo vypracovať prehľad možných spôsobov pokrytia pre vnútorné mobilné FSO siete, navrhnuť a experimentálne overiť pokrytie priestoru a zároveň ho porovnať so softwarovou simuláciou pokrytia priestoru. V prvých kapitolách je vypracovaný prehľad o vnútornom optickom systéme. Hlavne o systéme využívajúcom komunikáciu prostredníctvom viditeľného bieleho svetla z LED diód. Práve pokrytie tohto systému bolo hlavnou náplňou tejto práce. Jedná sa o systém s množstvom výhod a veľkou perspektívou do budúcnosti. Pri dnešnom nahradzovaní klasických svietidiel práve LED svietidlami má táto komunikačná technológia dobré vyhliadky do ďalších rokov.

V kapitole s uvedenými spôsobmi pokrytia priestoru je vypracované rozdelenie na základe priamej viditeľnosti LOS a nepriamej viditeľnosti non-LOS medzi vysielačím a prijímacím zariadením. Tieto dve skupiny sa ďalej delia podľa stupňa smerového orientovania vysielačov a prijímačov na smerové, hybridné a nesmerové systémy. Pri každom systéme sú popísané vlastnosti a spôsob realizácie. Z hľadiska mobility majú výhodu systémy, ktoré nie sú pevné umiestnené a tak poskytujú slobodu pohybu pri ich využívaní. Mobilita je z hľadiska ďalšieho napredovania vývoja komunikácie nevyhnutná.

Ako sa popisuje v kapitole experimentálneho merania pokrytia, vybraný systém na overenie pokrytia bol nesmerový systém s priamou viditeľnosťou. Tento systém bol vybraný pretože predstavuje klasické umiestnenie svietidla, teda vysielača na strop v miestnosti a prijímača nachádzajúceho sa v priestore miestnosti. Bolo zistené, že namerané pokrytie priestoru LED diódou a LED pásikom boli najsilnejšie práve pod ich umiestneným. Pokrytie priestoru LED pásikom bolo menej intenzívnejšie. Na druhej strane bolo však rovnomernejšie ako pri pokrytí bodovým zdrojom svetla, teda LED diódou.

Pri simuláciách pokrytia priestoru boli dosiahnuté výsledky podobné ako pri meraniach. Potvrdilo sa, že LED dióda a LED pásik, pokrývali najintenzívnejšie priestor v strede prijímacej plochy simulácie. So zväčšujúcou sa vzdialenosťou od vysielača pokrytie slablo, takže sa tu potvrdila teória. Rovnomernejšie pokrytie bolo zistené opäť pri LED pásiku.

V podrobnejšom porovnaní medzi nameranými a nasimulovanými pokrytiami bolo zistené, že nasimulované pokrytia sú rovnomernejšie ako namerané pokrytia priestoru. Zistilo sa, že namerané pokrytie priestoru mali v porovnaní s nasimulovanými pokrytiami väčšiu intenzitu v strede plochy a potom táto intenzita klesala strmšie až ku krajom plochy. To mohlo spôsobovať to, že v simulácii bolo nastavených väčší počet lúčov ako mali skutočne LED diódy a nasimulované pokrytia boli tým pádom rovnomernejšie.

V návrhoch optimalizácie sa dospelo k výsledku, že umiestnenie a počet vysielačov hrá významnú rolu pri pokrytí priestoru.

Výsledkom práce je teda vypracovaný prehľad spôsobov pokrytia, navrhnuté a namerané pokrytie priestoru overené simuláciou. Tento výsledok by mohol slúžiť v budúcnosti ako podklad pre ďalšie práce v tejto oblasti. Prípadne by sa dal rozšíriť ďalšími typmi vysielačov alebo rozsiahlejšou analýzou a optimalizáciou pokrytí umiestnených vysielačov prvkov.

---

## Použitá literatura

- [1] SINGH, JOHN a TRIPATHI. A Review on Indoor Optical Wireless Systems. [online]. 2005 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://home.iitk.ac.in/~ynsingh/papers/OwsRev-paper1.pdf>
- [2] HEATLEY, WISELY, Ian NEILD a Peter COCHRANE. Optical Wireless: The Story So Far. [online]. 1998, č. 12 [cit. 2012-12-16]. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=735881>
- [3] KAHN a BARRY. Wireless Infrared Communications. [online]. 1997, č. 2 [cit. 2013-01-24]. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://pompone.cs.ucsb.edu/~wenye/majorexam/Communication/Kahn97.pdf>
- [4] TANG, Jaw-Luen a Yao-Wen CHANG. Design of an Omnidirectional Multibeam Transmitter for High-Speed Indoor Wireless Communications. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* [online]. 2009, roč. 2010, č. 1, s. 728468-, April 2010-04-17 [cit. 2013-04-29]. ISSN 1687-1499. DOI: 10.1155/2010/728468. Dostupné z: <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2010/1/728468>
- [5] Z. GHASSEMLOOY a A R HAYES. Indoor Optical Wireless Communication Systems – Part I: Review. [online]. 2003 [cit. 2013-01-10]. Dostupné z: <http://soe.northumbria.ac.uk/ocr/downloads/partI-rev.pdf>
- [6] JOHN R. BARRY a JOSEPH M. KAHN. Link design for nondirected wireless infrared communications. *Applied Optics* [online]. Washington: Optical Society of America, 1995, č. 19 [cit. 2013-04-29]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: <http://ee.stanford.edu/~jmk/pubs/link.design.appl.optics.95.pdf>
- [7] ABU SAHMAH M. SUPAAT a ABU BAKAR MOHAMMAD. *Advances in free space optical technology: Indoor Optical Wireless Communication* [online]. 2007 [cit. 2013-02-09]. ISBN 978-983-52-0670-2.
- [8] TELECOM REGULATORY AUTHORITY OF INDIA. Free Space Optics in Next Generation Wireless Networks. [online]. 2012 [cit. 2013-02-20].
- [9] DR.SHIKHA NEMA a BEENA R BALLAL. Developments in Indoor Optical Fiber Wireless Networks. [online]. 2011 [cit. 2013-03-02]. ISSN 2249-5789. Dostupné z: <http://www.ijcscn.com/Documents/Volumes/vol1issue2/ijcscn2011010201.pdf>
- [10] TANAKA, Yuichi. *A Study on Optical Wireless Communication Systems and Their Applications* [online]. Keio University, 2002 [cit. 2012-12-20]. Dissertation thesis. Keio University.
- [11] CUI, Kaiyun, Gang CHEN, Zhengyuan XU a Richard D. ROBERTS. Line-of-sight Visible Light Communication System Design and Demonstration. *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010 7th International Symposium on* [online]. 2010 [cit. 2013-03-02]. ISSN 978-1-86135-369-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5580360>
- [12] HOA LE MINH, Zabih GHASSEMLOOY, Dominic O'BRIEN \* a Grahame FAULKNER. Indoor Gigabit Optical Wireless Communications: Challenges and Possibilities. *Transparent Optical Networks (ICTON), 2010 12th International Conference on* [online]. 2010, č. 10 [cit.



- 
- 2013-04-29]. ISBN 978-1-4244-7799-9. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5549136>
- [13] ELGALA, Hany, Raed MESLEH a Harald HAAS. Indoor Broadcasting via White LEDs and OFDM. *IEEE transactions on consumer electronics* [online]. 2009, č. 9 [cit. 2013-04-29]. ISSN 0098-3063. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5277966>
- [14] WITAS, Karel, Jiri BOCHEZA, Jan VITASEK a Stanislav HEJDUK. *Comparison of communication via IR and visible light spectrum in mobile indoor FSO networks*. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Telecommunications, VŠB-Technical University of Ostrava.
- [15] AKELLA, Jayasri, Chang LIU, David PARTYKA, Murat YUKSEL, Shivkumar KALYANARAMAN a DUTTA. Building Blocks for Mobile Free-Space-Optical Networks. *2005 International Conference on Wireless and Optical Communications Networks: March 6-8, 2005 : Dubai, United Arab Emirates* [online]. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005 [cit. 2013-04-29]. ISSN 0-7803-9019-9. Dostupné z: <http://www.cse.unr.edu/~yuksemy-papers/wocn05-simulation.pdf>

---

## Zoznam príloh

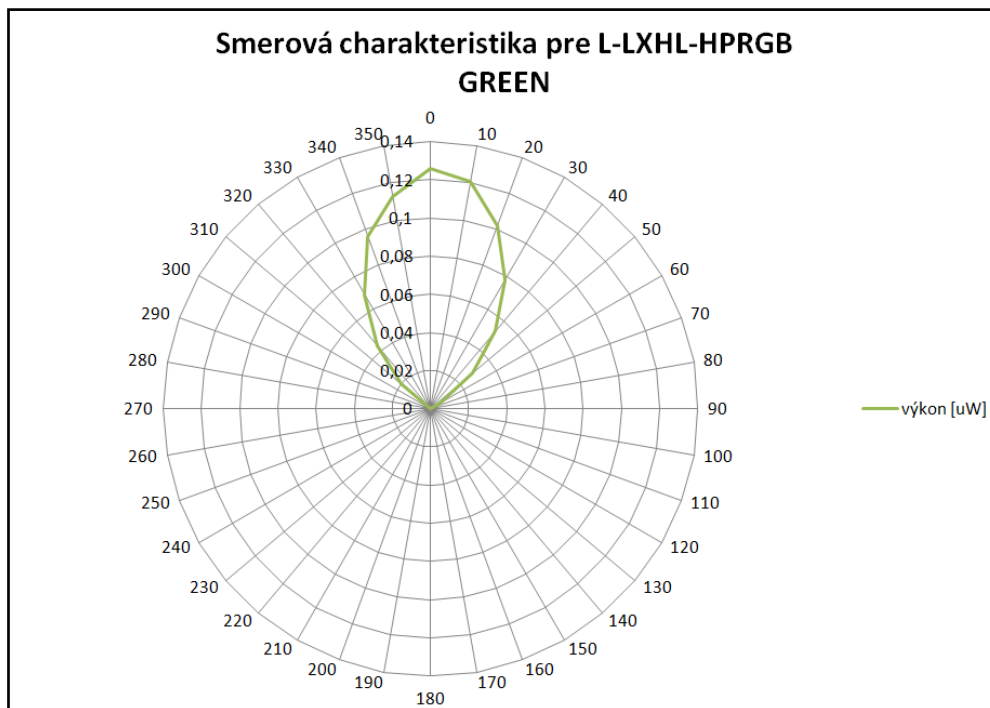
Príloha A: Smerové charakteristiky LED diód .....	II
Príloha B: Nasimulované pokrytia priestoru .....	II
Príloha C: Nasimulované optimalizácie pokrytí priestoru .....	VII

Súčasťou BP je CD.

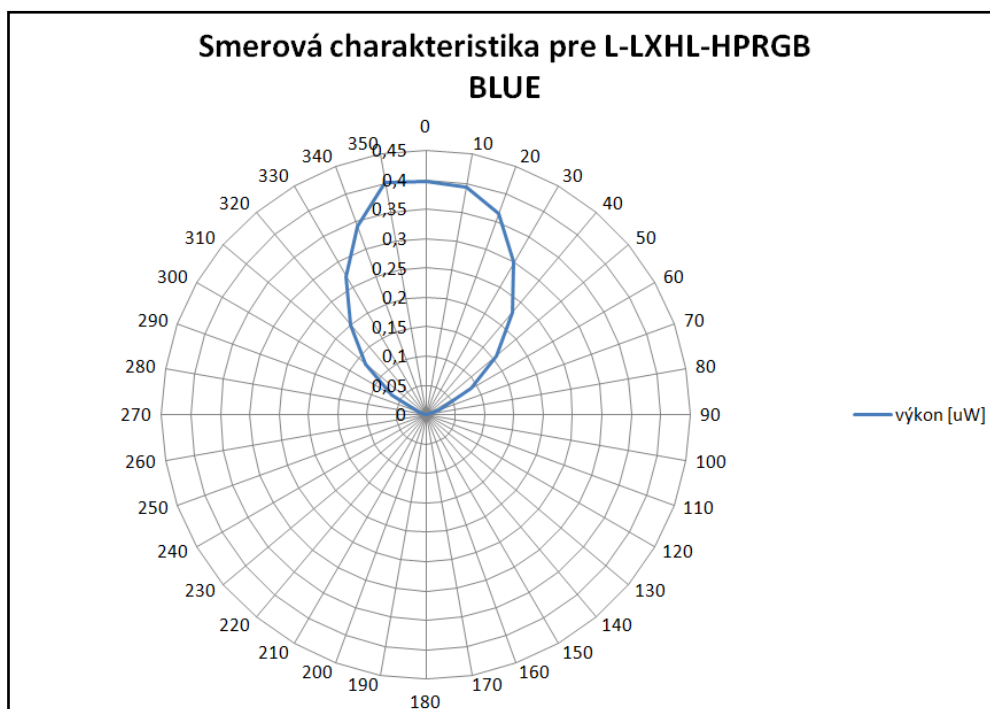
Adresárová štruktúra priloženého CD: - meranie simulacia porovnanie excel  
- namerané pokrytie priestoru matlab

*Príloha A: Smerové charakteristiky LED diód*

**Smerové charakteristiky pre LED diódu L-LXHL-HPRGB**

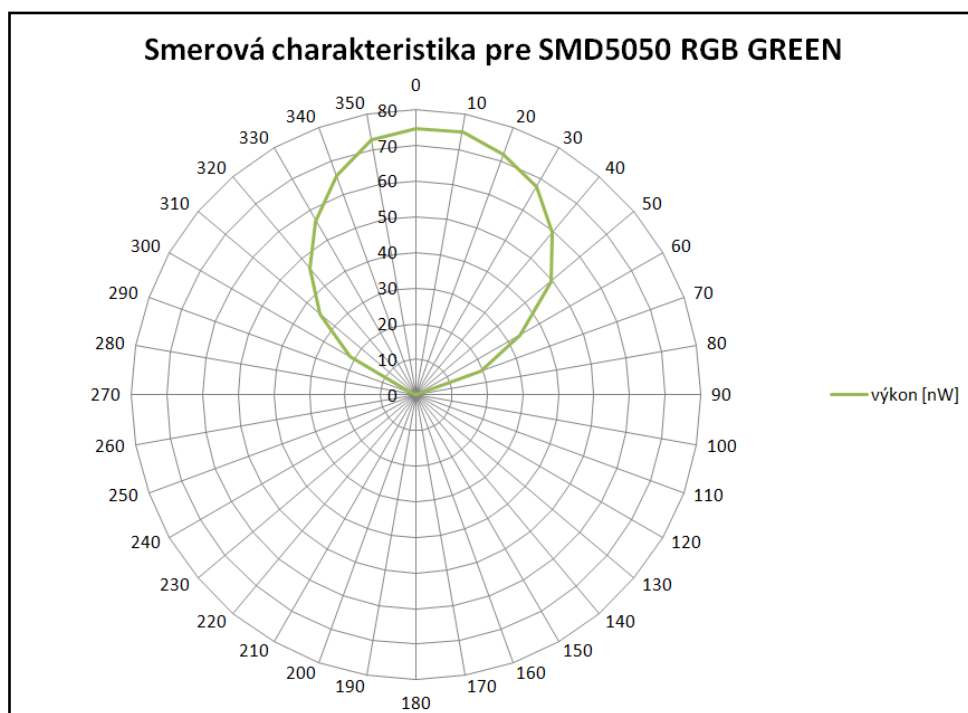


*Obrázok A.1: Nameraná smerová charakteristika pre zelenú farbu*

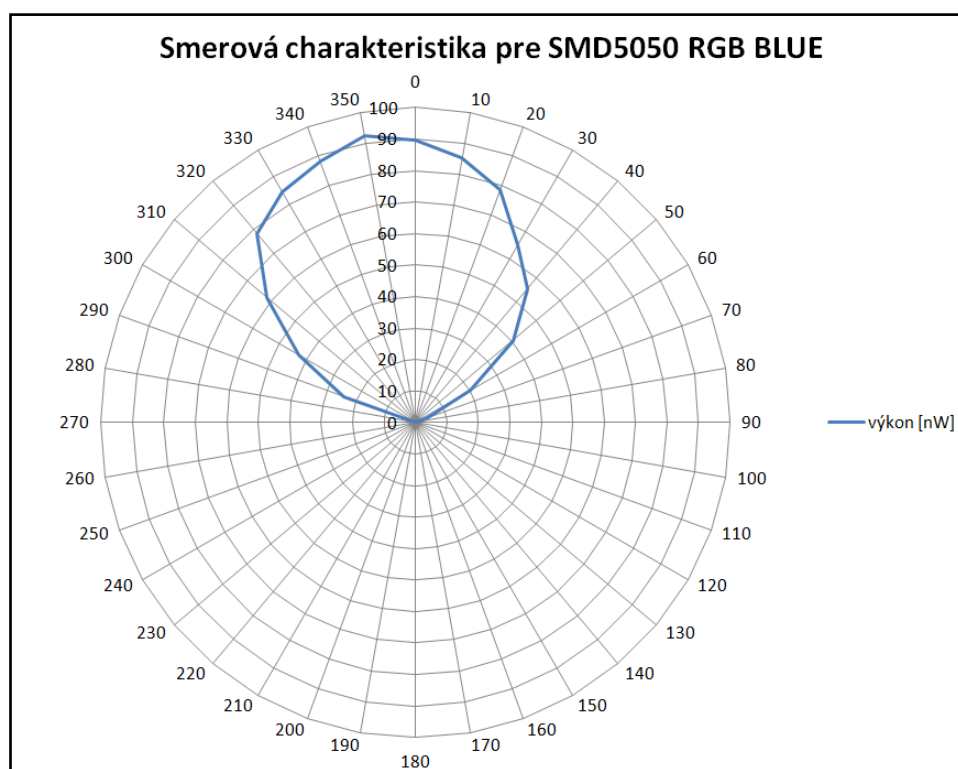


*Obrázok A.2: Nameraná smerová charakteristika pre modrú farbu*

## Smerové charakteristiky pre LED diódu SMD5050 RGB



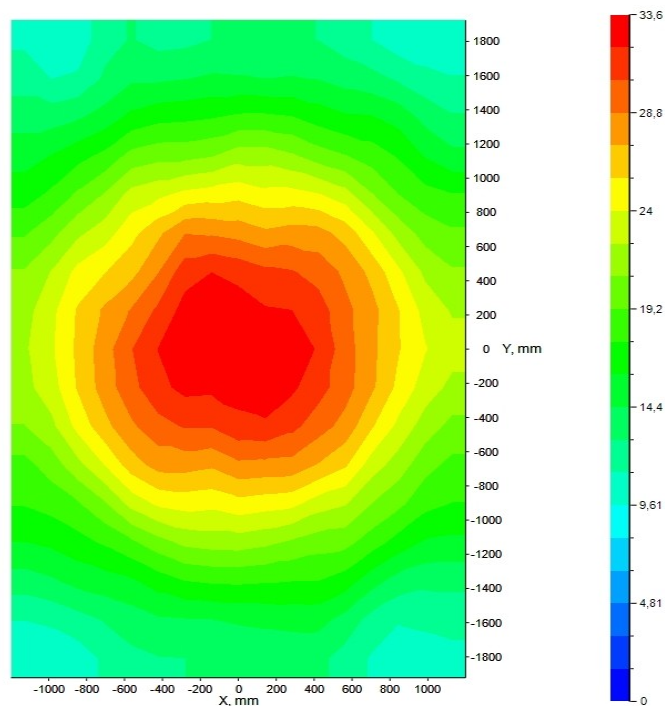
Obrázok A.3: Nameraná smerová charakteristika pre zelenú farbu



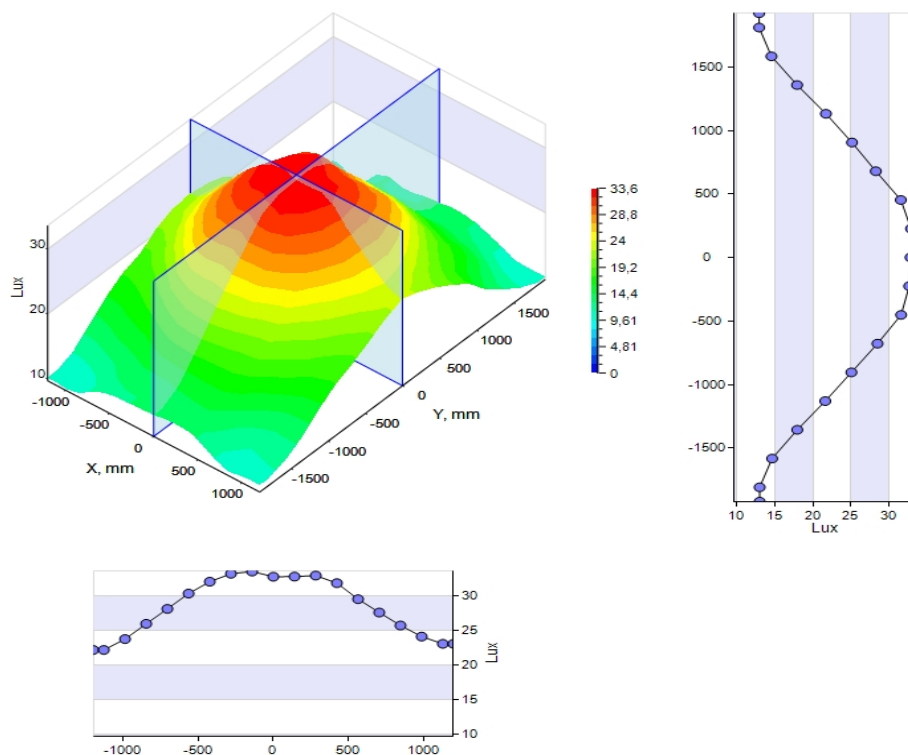
Obrázok A.4: Nameraná smerová charakteristika pre modrú farbu

*Príloha B: Nasimulované pokrytia priestoru*

**Nasimulované pokrytie priestoru LED diódou**

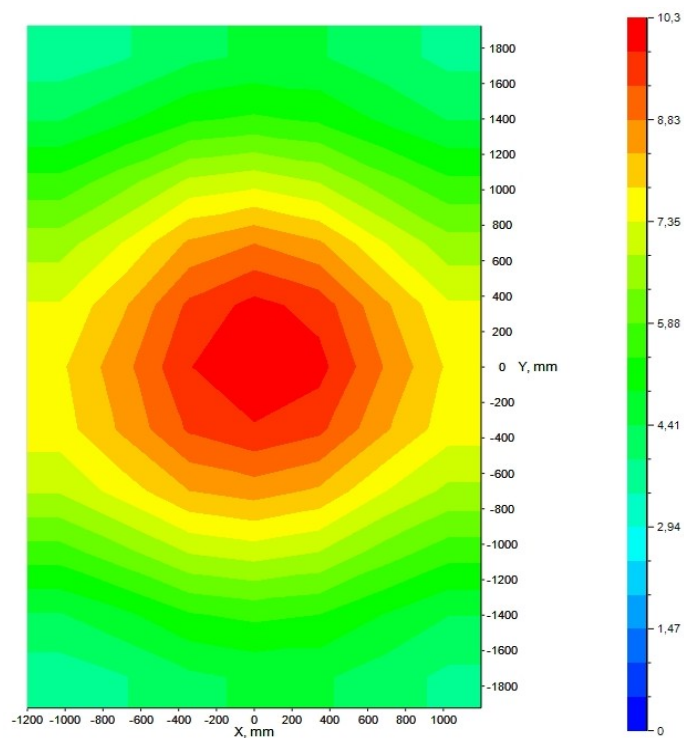


*Obrázok B.1: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru LED diódou (pohľad z hora)*

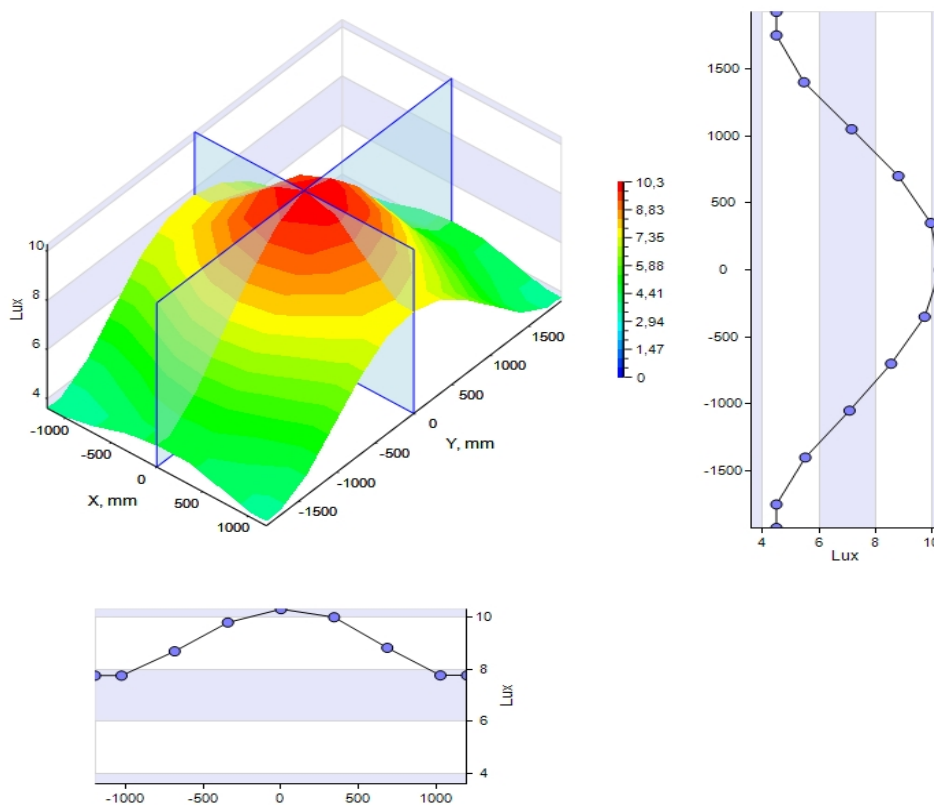


*Obrázok B.2: Zobrazenie pozdĺžneho a priečneho prierezu grafu pokrytia priestoru LED diódou*

### Nasimulované pokrytie priestoru LED páskom

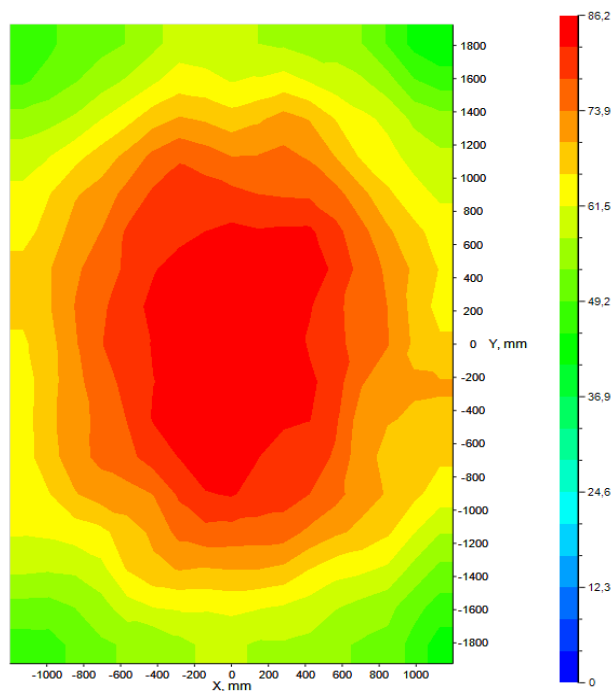


Obrázok B.3: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru LED páskom (pohľad z hora)

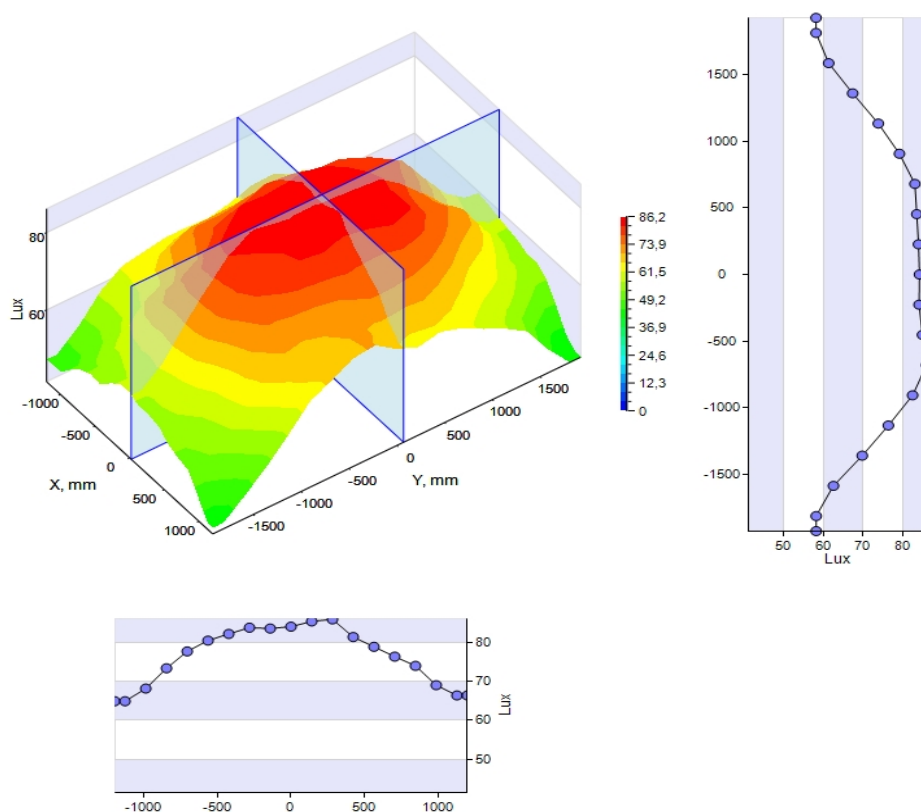


Obrázok B.4: Zobrazenie pozdĺžneho a priečného prierezu grafu pokrytia priestoru LED páskom

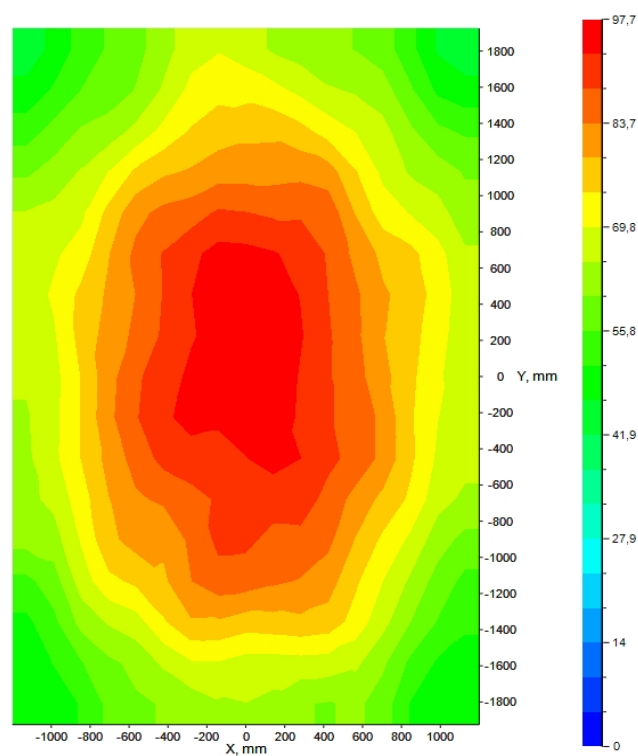
**Nasimulované optimalizácie pokrytí priestoru LED diódami**



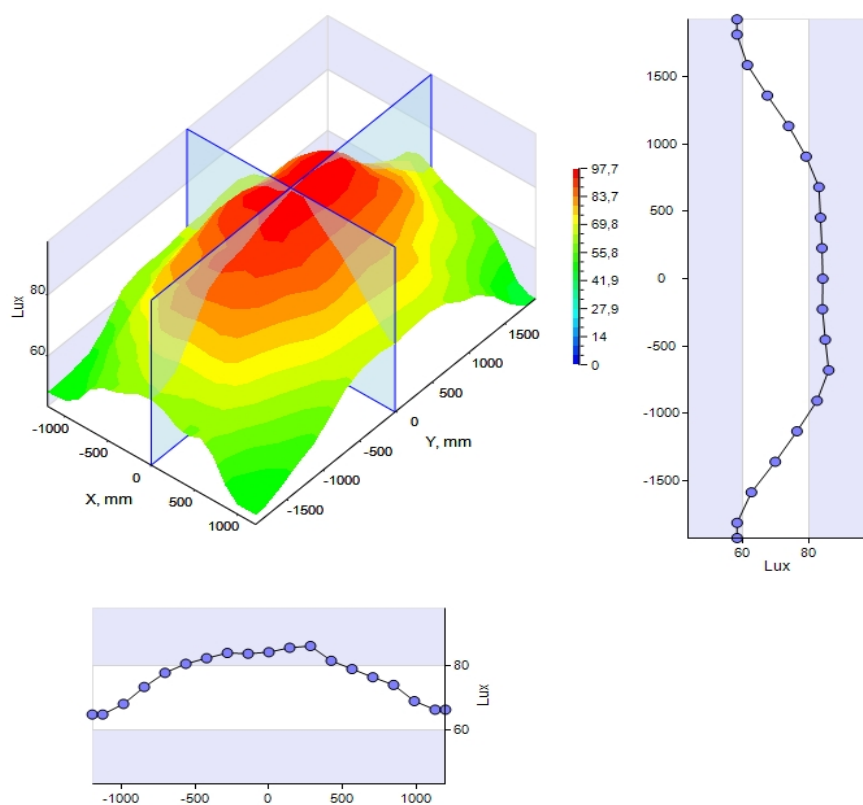
Obrázok C.1: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru štyrmi LED diódami (pohľad zhora)



Obrázok C.2: Prierezy nasimulovaného grafu pokrytia priestoru štyrmi LED diódami

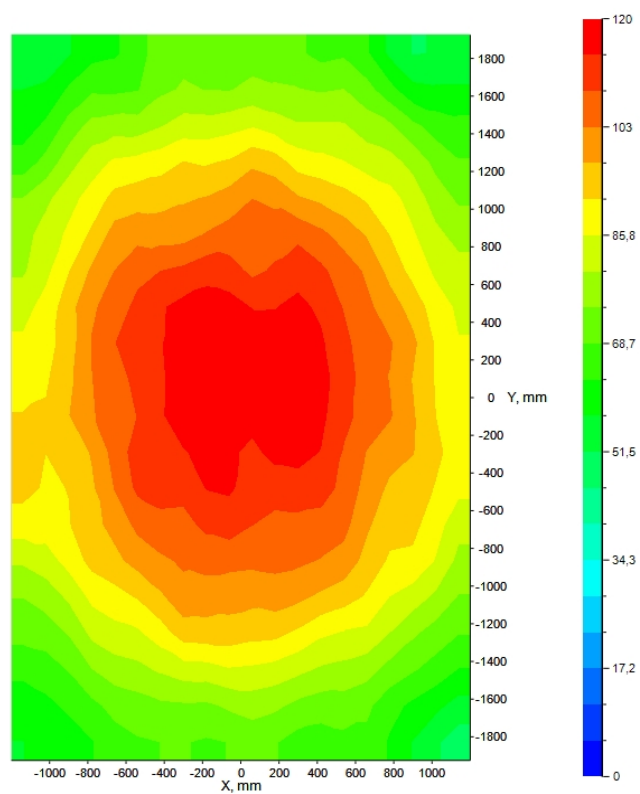


Obrázok C.3: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru štyrmi LED diódami umiestnenými za sebou (pohľad zhora)

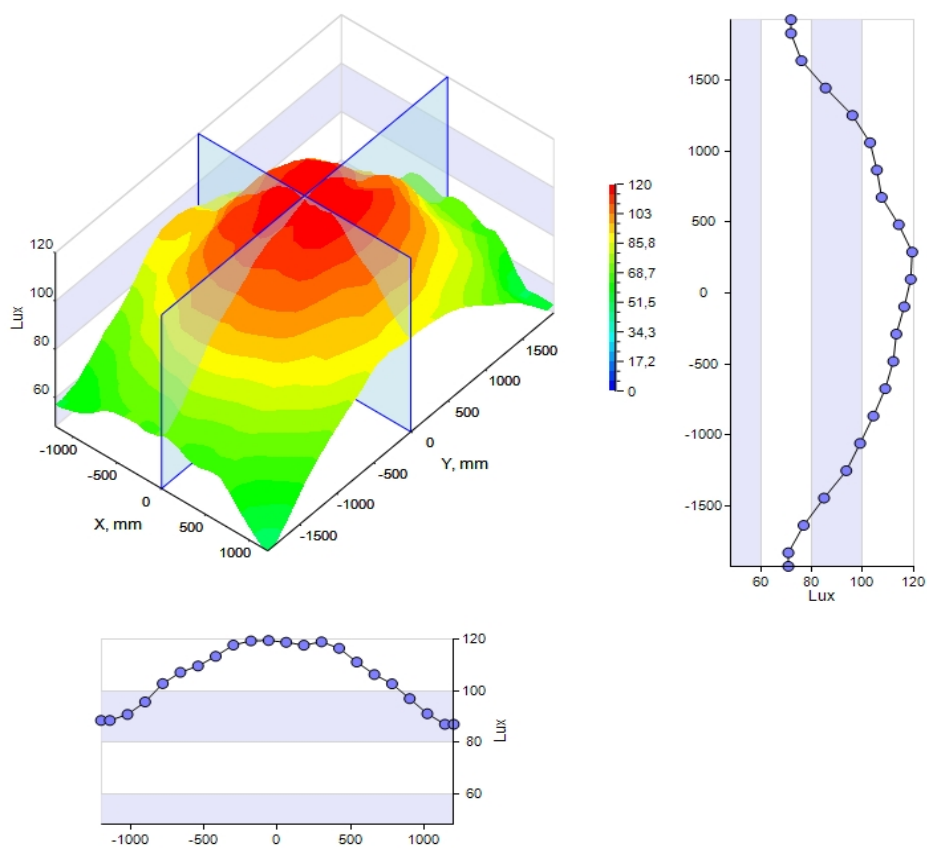


Obrázok C.4: Prierezy grafu pokrytia priestoru štyrmi LED diódami umiestnenými za sebou



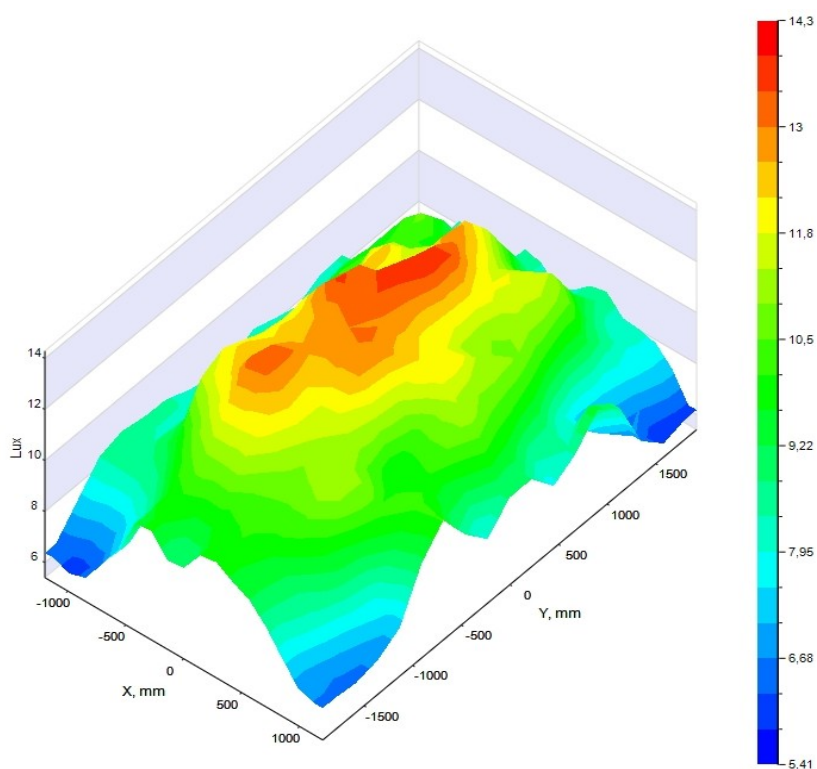


Obrázok C.5: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru piatimi LED diódami (pohľad z hora)

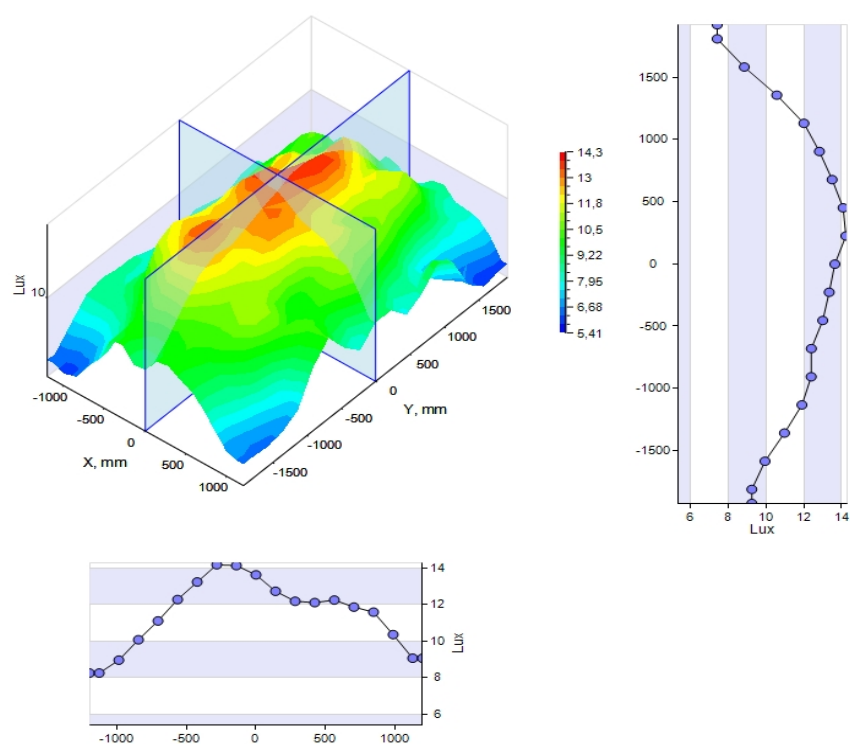


Obrázok C.6: Prierezy grafu pokrytia priestoru piatimi LED diódami

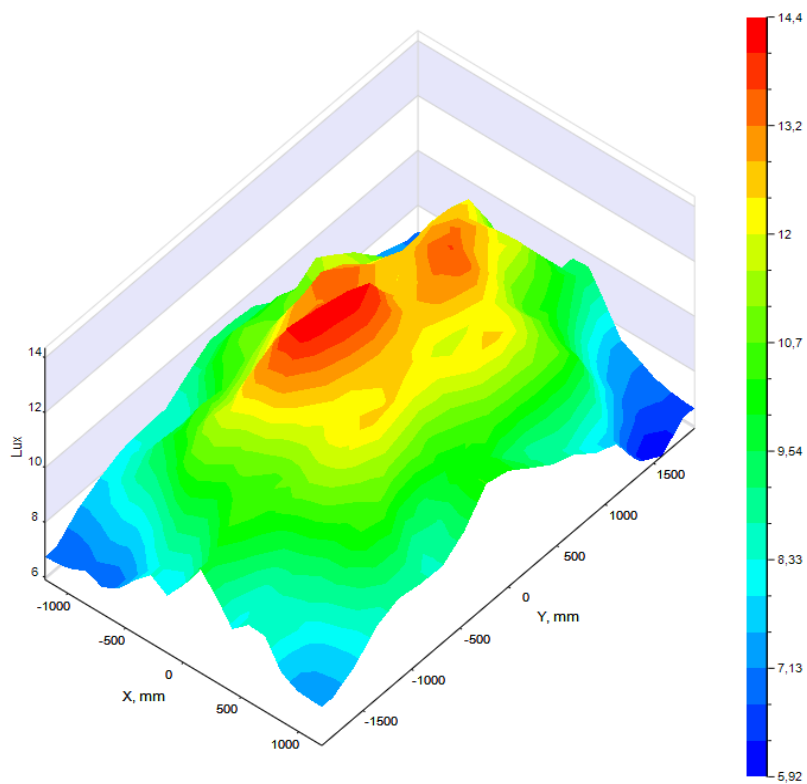
## Nasimulované optimalizácie pokrytí priestoru LED pásikmi



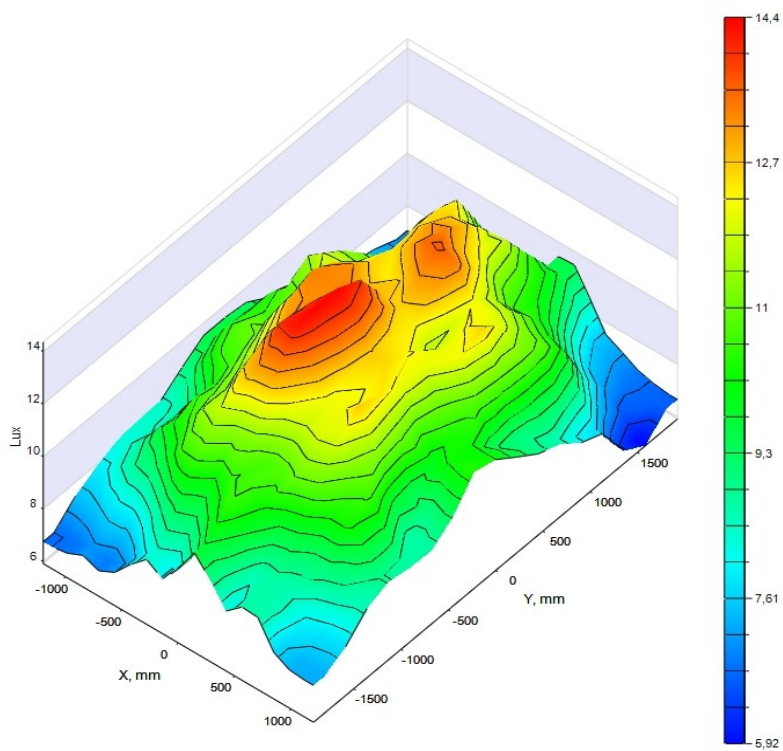
Obrázok C.7: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru dvoma LED pásikmi umiestnenými za sebou (zobrazenie minimálnej hodnoty intenzity osvetlenia)



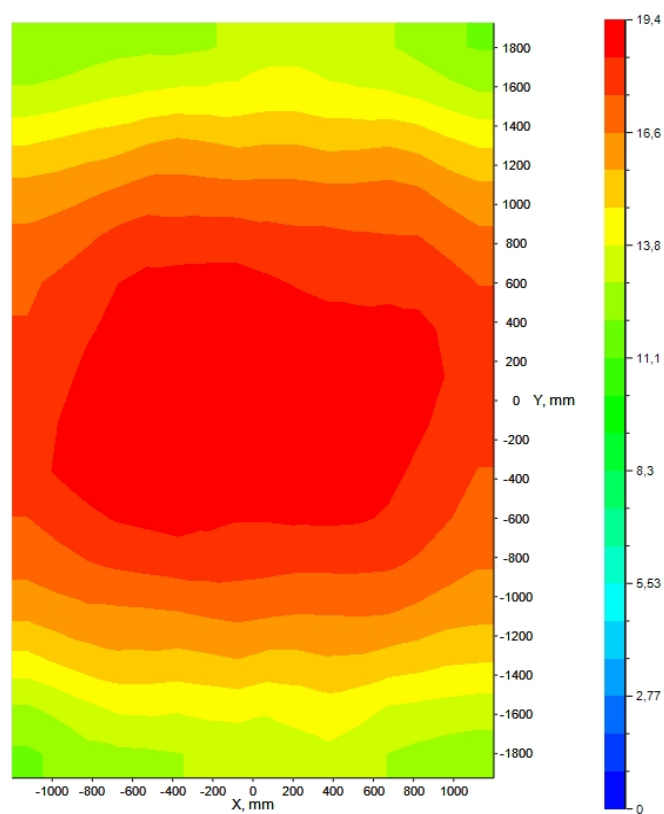
Obrázok C.8: Prierezy grafu pokrytia priestoru LED pásikmi umiestnenými za sebou



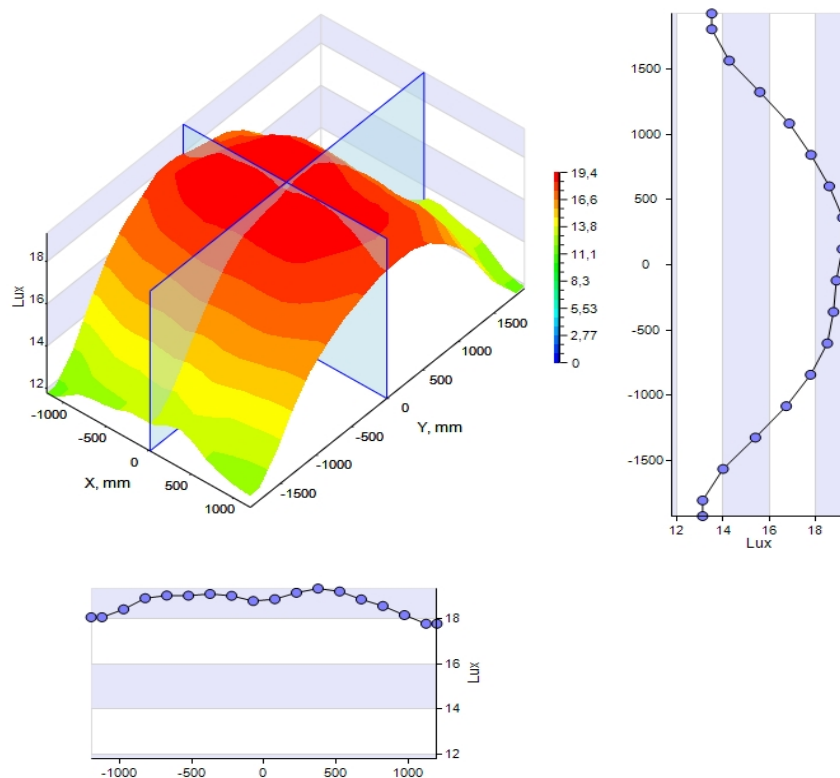
Obrázok C.9: Graf nasimulovaného pokrytia priestoru dvoma LED pásikmi umiestnenými vedľa seba (zobrazenie minimálnej hodnoty intenzity osvetlenia)



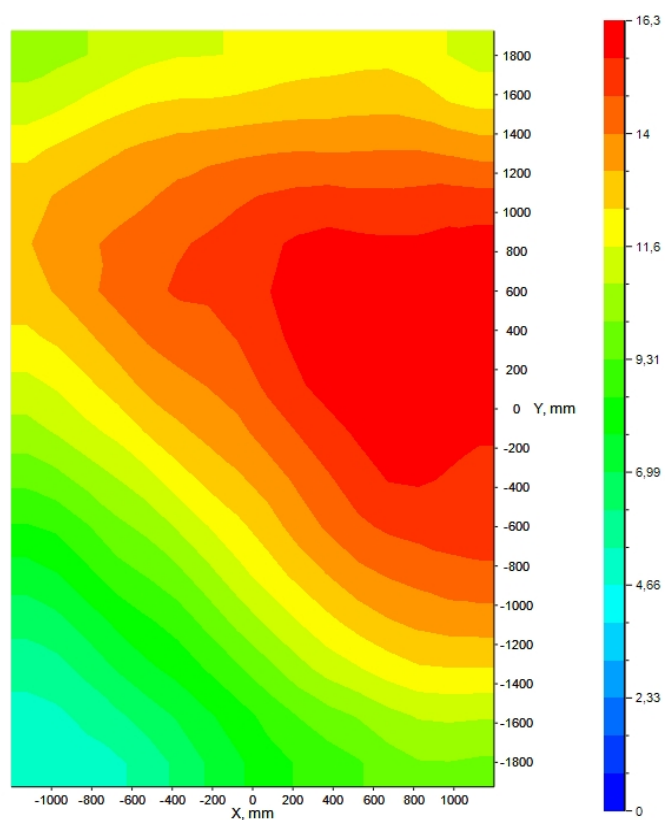
Obrázok C.10: Nasimulovaný pokrytie priestoru dvomi LED pásikmi vedľa seba s vyznačenými hranicami intenzity pokrytia



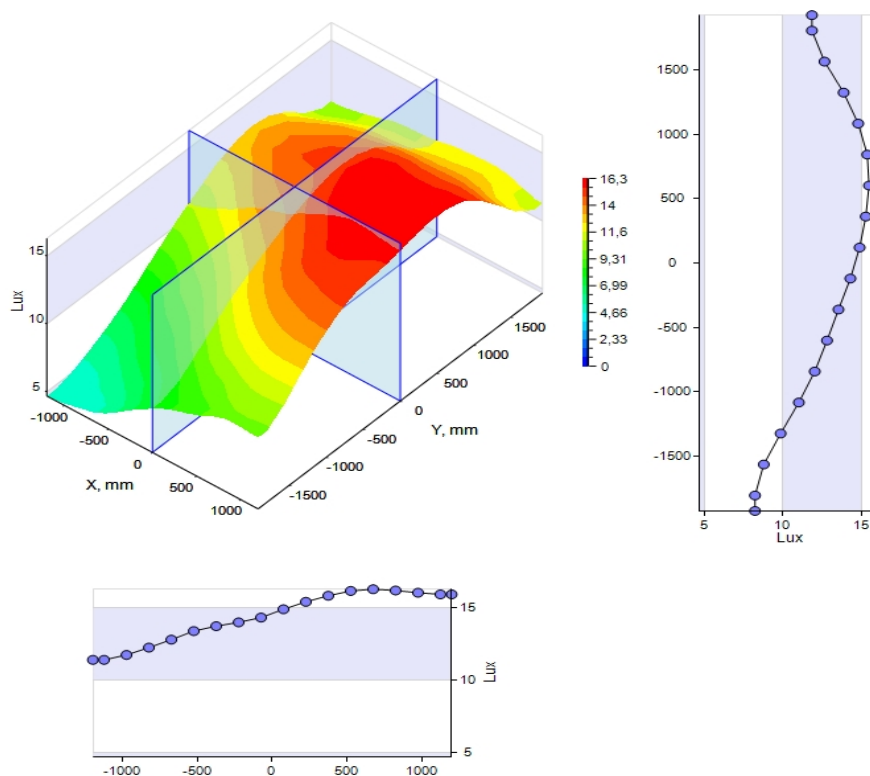
Obrázok C.11: Nasimulovaný graf pokrytia priestoru štyrmi LED pásikmi umiestnenými po krajoch (pohľad zhora)



Obrázok C.12: Prierezy grafu pokrytia priestoru štyrmi LED pásikmi umiestnenými po krajoch



Obrázok C.13: Nasimulovaný graf pokrytia priestoru tromi LED pásikmi umiestnenými po krajoch (pohľad zhora)



Obrázok C.14: Prierezy grafu pokrytia priestoru tromi LED pásikmi umiestnenými po krajoch